УДК 656.1

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ КОСОМ НАЕЗДЕ НА БОКОВЫЕ ТРОСОВЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ УДАРА

Колесникова Галина Петровна, преподаватель Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, Россия,143900, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8, <u>kolesnikovagp@mail.ru</u>

Аннотация. В работах [1,2] был описан алгоритм аналитического расчета кинематических характеристик автомобильного транспортного средства (АТС) при косом наезде на боковые тросовые ограждения. Аналитическое построение траекторий позволяет провести как проверку корректности разрабатываемой модели МКЭ тросовых ограждений, так и могут быть использованы при исследовании движения автомобильного транспортного средства непосредственно при построении МКЭ. Результаты аналитического расчета были подтверждены в работах [1,2] данными математического моделирования наезда по данным натурных испытаний [3]. МКЭ моделирование производилось с помощью многоцелевого конечно-элементного комплекса LS-Dyna.

Настоящая работа исследует, насколько необходимо учитывать ударное воздействия при контакте ATC со стойками тросового ограждения, и насколько учет ударного воздействия влияет на результаты аналитического расчета.

Ключевые слова: тросовое ограждение; аналитическое моделирование; траектория движения.

ANALYTICAL CALCULATION OF THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF AN AUTOMOBILE VEHICLE WITH OBLIQUE COLLISION WITH SIDE CABLE BARRIER WITH IMPACT TAKEN INTO ACCOUNT

Kolesnikova Galina P., lecturer Peter the Great Strategic Missile Troops Academy, 8, Karbysheva str., Balashikha, 143900, Russia, <u>kolesnikovagp@mail.ru</u>

Annotation. In [1,2], an algorithm for the analytical calculation of the kinematic characteristics of a motor vehicle has been described with oblique collision with side cable barrier. Analytical construction of the trajectories allows both verification of the developed model of the FEM of cable fencing and can be used to study the movement of an automobile vehicle directly during the construction of the FEM. The results of the analytical calculation have been confirmed in [1,2] by the data of mathematical modeling of collisions according to field tests [3]. FEM modeling was performed using the LS-Dyna multipurpose finite element complex.

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

In the article it has been explored how much impact must be taken into account when a motor vehicle comes in contact with racks of cable barrier, and how much impact accounting affects the results of an analytical calculation.

Keywords: cable barrier; mathematical modeling; analytical construction; trajectory.

Постановка задачи. Будем считать, что удар является абсолютно неупругим. Пусть т. *К* – точка контакта автомобиля и стойки, *l* – высота стойки, *h* – расстояние от основания стойки до т. *K*. (Рисунок 1).

Как и в работах [1,2], будем рассматривать автомобильное транспортное средство (ATC) как материальную точку массы *M*, кг.

Пусть наезд АТС на стойку происходит по плоскости П, расположенной под углом α_0 к горизонту и проходящей через стойку. В этой плоскости введем систему координат $O_1 \xi \eta$. (Рис. 1).



Рис. 1. Схема постановки задачи при исследовании удара стойка-АТС.

Исследование удара АТС-стойка. Согласно теории удара [4] для материальной точки (АТС) имеет место:

$$M\vec{u} - M\vec{v} = \sum_k \vec{S}_k.$$

Здесь \vec{u} – скорость точки после удара, \vec{v} – скорость точки до удара,

 \vec{S}_k –ударные импульсы, действующие на точку ($k = 1 ... n, n \in \mathbb{N}$).

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Путь АТС совершает наезд на стойку с некоторой скоростью \vec{v}_0 . В результате удара возникают ударные импульсы: \vec{S}' – ударный импульс, действующий на точку со стороны стойки, \vec{S} – ударный импульс, действующий на стойку со стороны АТС. (Рис. 1).

Тогда для АТС (точки массы *M*) в проекции на ось ξ верно:

$$Mu_{\xi} - Mv_0 = -S'.$$

Для стойки (вращение вокруг ос
и $\eta,$ проходящей через т. A – ось
 $\eta_A):$

$$I_{\eta_A}\omega_{\eta} - I_{\eta_A}\omega_{\eta}(0) = Sh$$

Здесь $\omega_{\eta}(0)$ – угловая скорость стойки до удара, то есть $\omega_{\eta}(0) = 0$; I_{η_A} – момент инерции стойки относительно т. *А*. Очевидно соотношение:

$$u_{c_{\xi}} = \frac{l}{2} \omega_{\eta}$$

где т. С – центр тяжести стойки.

Тогда:

$$u_{c_{\xi}} = \frac{l}{2} \cdot \frac{Sh}{I_{\eta_A}} = \frac{Slh}{2I_{\eta_A}}.$$

Для скорости т. К – точка контакта автомобиля и стойки – верно:

$$u_{K_{\xi}}=h\omega_{\eta}=2\frac{h}{l}u_{c_{\xi}}.$$

Поскольку удар – абсолютно неупругий, то:

$$u_{K_{\xi}} = u_{\xi}.$$

Таким образом,

$$u_{\xi} = 2\frac{h}{l}u_{c_{\xi}} = 2\frac{h}{l}\cdot\frac{Slh}{2I_{\eta_A}} = \frac{Sh^2}{I_{\eta_A}}.$$

Но, поскольку

$$Mu_{\xi} - Mv_0 = -S'.$$

И

$$S' = S$$

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

то для скорости АТС после удара верно соотношение:

$$u_{\xi} = \frac{h^2}{I_{\eta_A}} (Mv_0 - Mu_{\xi}) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow u_{\xi} \left(\frac{h^2}{I_{\eta_A}}M + 1\right) = \frac{h^2}{I_{\eta_A}}Mv_0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow u_{\xi} = \frac{\frac{h^2}{I_{\eta_A}}M}{\frac{h^2}{I_{\eta_A}}M + 1}v_0 = \frac{1}{1 + \frac{I_{\eta_A}}{h^2M}}v_0,$$

ИЛИ

$$u_{\xi} = \chi v_0$$
,

где

$$\chi = \frac{1}{1 + \frac{I_{\eta_A}}{h^2 M}}.$$

Масса АТС значительно превосходит массу стойки, поэтому верно:

$$\frac{I_{\eta_A}}{h^2 M} \to 0 \Longrightarrow \chi \to 1.$$

То есть потеря полной скорости при ударе о стойку равна:

$$\Delta = \left| \frac{\chi v_0 - v_0}{v_0} \right| \cdot 100\% = |\chi - 1| \cdot 100\%$$

Следовательно, можно сделать вывод, что потеря скорости АТС изза удара о стойку незначительна. То есть на торможение АТС оказывают влияние упругие и диссипативные свойства троса, а также сила трения АТС о тросовые ограждения.

Из анализа наезда также можно сделать вывод, что жесткость стойки может влиять на провоцирование вращательного движения АТС при зацеплении с ней, но не влияет значительно на процесс торможения.

В таком случае, роль стойки – обеспечить необходимое геометрическое положение троса.

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА электронный научный журнал Кусочно-непрерывное построение траектории движения АТС с учетом удара. Рассмотрим, насколько влияет на приближенное моделирование траектории АТС учет потери скоростей от удара со стойкой.

Уравнения движения АТС, и соотношения для некоторой условной частоты *р* и коэффициента затухания *ε*, полученные в [1]:

$$\begin{cases} M \ddot{y} = -\mu \dot{y} - c_{ynp} y; \\ M \ddot{x} = -f M \ddot{x}; \end{cases}$$
$$p^{2} = \frac{c_{ynp}}{M} \Longrightarrow c_{ynp} = M p^{2};$$
$$\varepsilon = \frac{\mu}{2M} \Longrightarrow \mu = 2M \varepsilon.$$



Рис. 2. Расчетная схема для k-го участка, заключенного между стойками k и (k + 1).

Для каждого k-го участка, заключенного между стойками k и (k + 1), примем за начальную скорость движения на этом участке скорость после удара с k-ой стойкой (рис. 2):

$$v_k(0) = u_{\xi_k}.$$

По данным натурных испытаний [4] для АТС типа ГАЗ-3102, год выпуска 1998, $Y^* = 0.6$, м, $v_0 = 25, \frac{M}{c}$, длина пути взаимодействия $x(\tau)=13$, м, $\tau = 0.5$, с, M = 1520, кг. Наезд происходит под углом 20° – угол между продольной осью и направлением движения испытуемого АТС, используемого для его наведения согласно методике, изложенной в ГОСТ Р 52721-2007 (п.6.1-6.6).

> № 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА электронный научный журнал

Объектом испытаний были тросовые ограждения марки 14ДД/У4(300)-П-1, 1-3, 0-ГБ. Стойки (СДТ-2/L согласно 14ДД/У4(300)-П-1, 1-3, 0-ГБ) состояли из двух элементов в виде квадратной трубы длиной 1500 мм с размером 50 × 50 × 3 (левой и правой). Высота стоек над поверхностью дорожного полотна – 1100 мм. [4]. Расчетные перемещения и траектория АТС, полученные посредством гармонического приближения [1,2]:

$$\begin{cases} x(t) = -0,204e^{-3,506t}sin(6,283t) + 24,782t; \\ y(t) = 1,361e^{-3,506t}sin(6,283t). \end{cases}$$

При этом:

$$c_{\text{ynp}} = Mp^2 = 1520 \cdot 6,283^2 = 60003,65528, \frac{\text{H}}{\text{M}} = 60, \frac{\text{\kappa}\text{H}}{\text{M}};$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{2M} \Longrightarrow \mu = 2M\varepsilon = 2 \cdot 1520 \cdot 3,506 = 10658,24, \frac{\text{H} \cdot \text{c}}{\text{M}};$$

$$\chi = \frac{1}{1 + \frac{I_{\eta_A}}{h^2 M}} = \frac{1}{1 + \frac{1,831}{156^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1520}} = 0,953.$$

Таким образом, при ударе о стойку потеря полной скорости составит:

$$\Delta = |\chi - 1| \cdot 100\% = |0,953 - 1| \cdot 100\% = 4,7\%.$$

Расчет 1-го участка. После удара о первую стойку получаем:

$$u_0^{\xi} = \chi v_0 = 0,953 \cdot 25 = 23,825, \frac{M}{c}$$

Скорость направлена под углом

$$\alpha_1^0 = 20^\circ$$
.

За начальную скорость для расчета на первом участке принимаем

рассчитанную u_0^{ξ} , и составим уравнения движения точки на этом участке:

$$\begin{cases} 1520\ddot{y} = -10658, 24\dot{y} - 60003, 65y; \\ \ddot{x} = -0, 15\ddot{y}. \end{cases}$$

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Или

$$\begin{cases} \ddot{y} = -7,012\dot{y} - 39,48y; \\ \ddot{x} = -0,15\ddot{y}. \end{cases}$$

Начальные условия движения после первого удара равны:

$$\begin{cases} x(0) = 0, m; \\ y(0) = 0, m; \end{cases}$$

И

$$\begin{cases} \dot{x}(0) = u_0^{\xi} \cos \alpha_0 = 23,825 \cdot \cos 20^{\circ} = 22,388, \frac{M}{c}; \\ \dot{y}(0) = u_0^{\xi} \sin \alpha_0 = 23,825 \cdot \sin 20^{\circ} = 8,149, \frac{M}{c}. \end{cases}$$

Получаем законы движения x(t) и y(t):

$$\begin{cases} y(t) = 1,297e^{-3,506t}sin(6,283t); \\ x(t) = -0,15 \cdot y(t) + 23,374t. \end{cases}$$

В конце первого участка (до контакта со следующей стойкой вдоль оси *x* точка проходит расстояние 3 м) в момент времени $t_1 = 0,1322, c$, скорости равны:

$$\begin{cases} \dot{x}(t_1) = 23,171, \frac{M}{c}; \\ \dot{y}(t_1) = 1,354, \frac{M}{c}. \end{cases}$$

Угол наклона скорости к горизонту составляет:

 $\alpha_1 = 3,322^{\circ}.$

Модуль скорости:

$$v(t_1) = 23,211, \frac{M}{c}.$$

Потеря полной скорости на первом участке составляет 7,707%; приращение скорости вдоль ось *x* равно 3,502%, потеря скорости вдоль оси *y* – 83,384%.

Расчет 2-го участка. После удара о вторую стойку скорость

составляет:

$$u_1^{\xi} = \chi v(0,1322) = 0,953 \cdot 23,211 = 22,12,\frac{M}{c}.$$

№ 4(22) декабрь 2019

. .

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Для расчета второго участка начальные условия имеют вид:

$$\begin{cases} x(t_2^0) = x(t_1) = 3, м; \\ y(t_2^0) = y(t_1) = 0,607, м; \end{cases}$$

И

$$\begin{cases} \dot{x}(t_2^0) = \dot{x}(t_1) = u_1^{\xi} \cdot \cos(3,322^\circ) = 22,082, \frac{M}{c}; \\ \dot{y}(t_2^0) = \dot{y}(t_1) = u_1^{\xi} \cdot \sin(3,322^\circ) = 1,282, \frac{M}{c}. \end{cases}$$

Уравнения движения на втором участке:

$$\begin{cases} y(t) = e^{-3,506t} (0,02\cos(6,283t) + 1,3\sin(6,283t)); \\ x(t) = -0,15 \cdot e^{-3,506t} y(t) + 22,274t + 0,146. \end{cases}$$

В конце второго участка (до контакта со следующей стойкой вдоль оси *x* точка проходит расстояние 3 м) в момент времени $t_2 = 0,26, c$, скорости равны:

$$\dot{x}(t_1) = 22,586, \frac{M}{c}, \dot{y}(t_1) = -2,083, \frac{M}{c}.$$

Угол наклона скорости к горизонту составляет:

 $\alpha_2 = -5,269^{\circ}.$

Модуль скорости:

$$v(t_2) = 22,682 \frac{M}{c}.$$

Приращение полной скорости на втором участке составляет 2,541%; приращение скорости вдоль ось *x* равно 2,153%, приращение по модулю скорости вдоль оси *y* – 38,454% (при этом скорость вдоль оси *y* поменяла знак).

Расчет 3-го участка. После удара о третью стойку скорость составляет:

$$u_3^{\xi} = \chi v(0,3624) = 0,953 \cdot 22,682 = 21,616, \frac{M}{c}.$$

Для расчета третьего участка начальные условия имеют вид:

$$\begin{cases} x(t_3^0) = x(t_2) = 6, \text{m}; \\ y(t_3^0) = y(t_2) = 0,521, \text{m}; \end{cases}$$

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

И

$$\begin{cases} \dot{x}(t_3^0) = \dot{x}(t_2) = u_3^{\xi} \cdot \cos(-5,269^\circ) = 21,525, \frac{M}{c}; \\ \dot{y}(t_3^0) = \dot{y}(t_2) = u_3^{\xi} \cdot \sin(-5,269^\circ) = -1,985, \frac{M}{c}. \end{cases}$$

Перемещения на третьем участке:

$$\begin{cases} y(t) = e^{-3,506t} (0,19\cos(6,283t) + 1,5\sin(6,283t)); \\ x(t) = -0,15 \cdot y(t) + 21,0083t + 0,616. \end{cases}$$

В конце третьего участка (до контакта со следующей стойкой вдоль оси x точка проходит расстояние 3 м) в момент времени $t_3 = 0,4,c,$ скорости равны:

$$\dot{x}(t_3) = 21,569, \frac{M}{c}, \dot{y}(t_3) = -2,28, \frac{M}{c}.$$

Угол наклона скорости к горизонту составляет:

 $\alpha_3 = -6,034^{\circ}.$

Модуль скорости:

$$v(t_3) = 21,689 \frac{M}{c}.$$

Приращение полной скорости на третьем участке составляет 0,3%; приращение скорости вдоль ось *x* равно 0,204%, приращение скорости вдоль оси *y* – 12,938%.

Расчет 4-го участка. После удара о четвертую стойку скорость составляет:

$$u_4^{\xi} = \chi v(0,3624) = 0,953 \cdot 21,689 = 20,67, \frac{M}{c}.$$

Для расчета третьего участка начальные условия имеют вид:

$$\begin{cases} x(t_4^0) = x(t_3) = 9, \text{M}, \\ y(t_4^0) = y(t_3) = 0,177, \text{M}, \end{cases}$$

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

И

$$\begin{cases} \dot{x}(t_4^0) = \dot{x}(t_3) = u_4^{\xi} \cdot \cos(-6,034^\circ) = 20,555, \frac{M}{c}; \\ \dot{y}(t_4^0) = \dot{y}(t_3) = u_4^{\xi} \cdot \sin(-6,034^\circ) = -2,173, \frac{M}{c}. \end{cases}$$

Перемещения на четвертом участке:

$$\begin{cases} y(t) = 1,24e^{-3,506t}sin(6,283t); \\ x(t) = -0,15 \cdot y(t) + 20,225t + 0,935. \end{cases}$$

В конце четвертого участка (до контакта со следующей стойкой вдоль оси x точка проходит расстояние 3 м) в момент времени $t_4 = 0,5,c$, скорости равны:

$$\dot{x}(t_4) = 20,427,\frac{M}{c}, \dot{y}(t_4) = -1,35,\frac{M}{c}.$$

Угол наклона скорости к горизонту составляет:

 $\alpha_4 = -3,781^{\circ}.$

Модуль скорости:

$$v(t_4) = 20,472 \frac{M}{c}.$$

Потеря полной скорости на втором участке составляет 0,967%; потеря скорости вдоль ось *x* равно 0,627%, потеря скорости вдоль оси *y* – 60,963%.

Графики перемещений и скоростей представлены на рисунках 3, 4 соответственно. Серыми сплошными линями обозначены перемещения и скорости, полученные с помощью гармонического метода в работе [1].

> № 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА



Рис. 3. Расчетные отклонения для АТС типа ГАЗ-3102: сплошная линия - вдоль оси х; пунктирная линия - вдоль оси у.

№ 4(22) декабрь 2019

Автомобиль • Дорога • Инфраструктура



Рис. 4. Расчетные скорости для АТС типа ГАЗ-3102: верхние графики (сплошные линии) – скорости вдоль оси x (\vec{v}_x), нижние графики (пунктирные линии) – скорости вдоль оси y (\vec{v}_y).

Заключение. В работе был изложен алгоритм аналитического построения траектории АТС при косом наезде на боковые тросовые ограждения с учетом удара. Проведенные вычисления показывают, что учет удара влияет на полученные результаты, но необходимость учета удара зависит от целей проводимых исследований, поскольку разница в получаемых результат сказывается, в первую очередь, в рассчитанных скоростях вдоль продольной оси движения *x*.

Перемещения же вдоль осей *x* и *y*, а также скорости вдоль оси *y* совпадают с результатами гармонического и полиномных методов построений [1,2], которые не столь громоздки в применении.

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА электронный научный журнал

Литература

1. Колесникова, Г.П. Приближенное математическое моделирование траектории движения АТС при косом наезде на боковые тросовые ограждения / Г.П. Колесникова, А.Р. Гасайниев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. - 2018. - №1(15).

2. Колесникова, Г.П. Приближенные методы аналитического моделирования траектории движения АТС при косом наезде на боковые тросовые ограждения / Г.П. Колесникова // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018 - №2(16)

3. Результаты натурных испытаний ФГУП «НАМИ», 2016

4. Курс теоретической механики: учебник для вузов / Дронг В.И., Дубинин В.В., Ильин М.М. [и др.]; под ред. Колесникова К.С., Дубинина В. В. - 5-е изд., испр. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. - 580 с.

5. ГОСТ Р 52721-2007 (п.6.1-6.6)

References

1. Kolesnikova G.P., Gasajniev A.R. *Avtomobil'*. *Doroga*. *Infrastruktura*. 2018, no 1(15).

2. Kolesnikova G.P. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2018, no 2(16).

3. Rezul'taty naturnyh ispytanij FGUP «NAMI», 2016

4. Drong V.I., Dubinin V.V., Il'in M.M. [i dr.]; red. Kolesnikov K.S., Dubinin

V.V. *Kurs teoreticheskoj mekhaniki* (The course of theoretical mechanics), Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2017, 580 p.

5. GOST R 52721-2007 (p.6.1-6.6)

№ 4(22) декабрь 2019

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА