

ANALIZA TORU RUCHU SAMOCHODU PO UDERZENIU W BARIERĘ BETONOWĄ

THE ANALYSIS OF A CAR MOTION PATH AFTER COLLISION WITH A CONCRETE BARRIER

Analizie poddano przebieg toru ruchu samochodu po uderzeniu w betonową barierę drogową. Tor ruchu samochodu w fazie po zderzeniowej jest istotnym wskaźnikiem wypełniania funkcji ochronnej przez barierę. Wykorzystano tu model dynamiki procesu zderzenia i deformacji samochodu uderzającego w barierę oraz ruchu tej bariery. Model przedstawiono w pracy [7]. Przeprowadzono obliczenia, które pokazały wpływ kąta uderzenia i energii uderzenia na tor ruchu samochodu po zakończeniu fazy kontaktu z barierą. Obliczenia wykonano z uwzględnieniem skutków ustawiania bariery na różnych podłożach. Rozważono ruch samochodów kategorii M1 (segment handlowy B i C), czyli najczęściej występujących na drogach. Podczas analizy wyników obliczeń brano pod uwagę kąt odejścia toru ruchu samochodu, mierzony bezpośrednio po zakończeniu fazy kontaktu pojazdu z barierą. Oddzielnie oceniono odległość toru ruchu środka masy samochodu od krawędzi bariery w jej położeniu statycznym. Dokonano analitycznej aproksymacji wyników obliczeń i uzyskano zależności wielkości charakteryzujących przebieg toru ruchu samochodu od kąta i energii uderzenia w barierę.

Słowa kluczowe: transport, bariery drogowe, bezpieczeństwo ruchu drogowego, zderzenia.

A course of a car motion path after collision with a concrete road barrier has been analyzed. A car motion path at the postimpact stage makes a significant index of the protective function fulfilled by a barrier. A model of the impact process dynamics and deformation of a car hitting the barrier as well as the barrier motion have been used in this work. That model is presented in [7]. Calculations have been carried out that indicated the influence of the impact angle and impact energy on the car motion path after completion of the barrier contact stage. Calculations have been carried out considering the effects of placing the barrier on different types of the ground. Motion of the M1 category cars has been considered (commercial segment B and C), that is the most common cars on the roads. During the analysis of computation results, the car path deflection angle, measured just after the end of the car and barrier contact stage, has been considered. A separate evaluation of the distance between the motion path of the centre of the car mass and the edge of the barrier in its static position, has been performed. Analytical approximation of results has been performed and dependences of values characterizing the course of the car motion path on the impact angle and the impact energy have been obtained.

Keywords: transport, road safety, safety barriers, roadside crash.

1. Wstęp

Bariery drogowe są zwykle usytuowane w ciągu dróg i pełnią funkcje ochrony przed zjechaniem pojazdu poza krawędź pasa lub drogi. Podczas wypełniania swoich zadań bariery mogą wchodzić w bezpośredni kontakt z pojazdami (kolizja lub wypadek drogowy). Zatem powinny być konstrukcyjnie przystosowane do tego kontaktu. W tej roli mają zastosowanie bariery betonowe, zestawiane z segmentów o różnej długości i masie.

Bariery zwykle montowane są w taki sposób, aby w sytuacji kolizyjnej spowodować zmianę toru ruchu pojazdu opuszczającego jezdnię na kierunek zbliżony do jej osi (zderzenia o charakterze ślizgowym). Funkcjonowanie bariery ma istotny wpływ na bezpieczeństwo, bo ponad 15 % samochodów osobowych, opuszczających pas drogowy, uderza w bariery ochronne. Kąt uderzenia zwykle nie przekracza 10 stopni. Dzięki poprawnej konstrukcji bariery, ponad 90 % z tych pojazdów nie ulega przewróceniu [5, 6].

Celem pracy jest analiza zachowania się samochodów, głównie przebiegu toru ich ruchu po uderzeniu w ochronną barierę betonową o standardowych parametrach, ustawianą na różnych podłożach. Ocenie podlegać będzie przede wszystkim odległość toru ruchu środka masy samochodu od krawędzi ba-

1. Introduction

The road barriers are usually located along the roads and they provide protection against vehicle crossing the edge of the lane or the road. When fulfilling their tasks, the barriers can have a direct contact with vehicles (collision or road accident). So their structure should be adapted for such contact. Therefore the concrete barriers, made of segments of various length and weight, play that role.

The barriers are installed in a way that in case of collision they can change the motion path of a vehicle going out of the road to a direction close to its axis (sliding collisions). Barrier functions have a significant impact on the safety, as over 15% of passenger cars going out of the road lane hit the protective barriers. The impact angle usually does not exceed 10 degrees. Thanks to a proper barrier structure, over 90% of those vehicles do not roll over [5, 6].

The objective of this work is to analyze the behaviour of cars, mostly the course of the path of their motion after hitting the concrete protective barrier of standard parameters, placed on different grounds. The evaluation mostly considers a distance of the motion path of the centre of car mass from the barrier edge and the angle of the car deflection from the barrier at the postimpact stage. Analyzed values are of high significance

riery oraz kąt odjazdu samochodu od bariery w fazie po zderzeniowej. Analizowane wielkości mają ważne znaczenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego, a przede wszystkim wpływają na planowanie ustawiania barier ochronnych na różnych podłożach (bariery skrajne lub rozdzielające).

W pracy pokazane zostaną miary charakteryzujące przebieg toru ruchu samochodu po uderzeniu w barierę oraz wartości tych miar dla kilku różnych sytuacji drogowych.

2. Zachowanie się samochodu w czasie uderzenia w barierę

Analiza przebiegu uderzenia samochodu w barierę zwykle pozwala na wydzielenie trzech faz tego procesu:

- ruch przed zderzeniowy samochodu w chwili tuż przed początkiem kontaktu z barierą;
- uderzenie samochodu w barierę i obrót do pozycji równoległej do bariery; następuje rozpraszanie energii ruchu samochodu oraz trwa proces jego deformacji;
- koniec kontaktu samochodu z barierą i samodzielny ruch samochodu od bariery [6].

Oczywiście, przebieg niektórych sytuacji krytycznych jest bardziej złożony i może zawierać wjazd samochodu na barierę, przerwanie bariery, wywrócenie samochodu itp. Każda z faz tego procesu wymaga odpowiednich metod analizy i modelowania. W pracy analizowano przebieg fazy trzeciej, czyli ruch samochodu po ustaniu jego kontaktu z barierą.

Nowoczesne bariery betonowe to zespół połączonych ze sobą segmentów. Poszczególne segmenty są sztywne, ale ich połączenie ma właściwości przegubu o ograniczonej ruchliwości. Do stosowania w Polsce wprowadzone zostały bariery betonowe pełne o zarysie ściany bocznej typu „F”, bardziej bezpiecznym dla samochodów osobowych niż stosowany w niektórych krajach zarys New Jersey [4, 11, 14].

W pracy [10] opisano zachowanie się samochodu osobowego po uderzeniu w barierę przy niskich i średnich wartościach prędkości jazdy (do 60 km/h). Zwykle, przy uderzeniu pod kątem do 10...15 stopni, przebieg toru ruchu samochodu ma charakter ślizgowy. Trudno jest natomiast prognozować zachowanie się samochodów po uderzeniu w barierę ze znaczną prędkością. Z kolei komputerowa symulacja zderzeń samochodów, która jest prowadzona w wielu ośrodkach badawczych, skupiona jest głównie na pojazdach lub barierach w aspekcie konstrukcyjnym. Natomiast niewiele jest prac poświęconych analizie zachowania się samochodów po uderzeniu w barierę.

3. Model i zakres badań

Model procesu zderzenia samochodu z barierą zbudowano w programie PC Crash i Matlab. Powstał na podstawie rezultatów obserwacji sytuacji krytycznych w ruchu drogowym i analizy ustawiania tymczasowych barier betonowych. Model uwzględnia ustawienie bariery na różnych podłożach, jako połączone przegubowo w łańcuch segmenty. Wykorzystywany matematyczny model ruchu pojazdu uderzającego w barierę i ruchu elementów bariery opracowano na podstawie prac [8, 9, 12, 13]. Proces zderzenia i deformacji samochodu w kontakcie z barierą jest opisany modelem Kudlicha-Slibara [9, 13]. Model przedstawiono w pracy [7].

Parametry bariery dobrano na podstawie informacji producentów, wybierając segmenty o długości 4 m i masie 2200 kg ze

for the road traffic safety and first of all they affect the planning of placing the protective barriers on various grounds (edge barriers or separating barriers).

This work presents measures characterizing a course of a car motion path after hitting the barrier and the values of those measures for several different road situations.

2. Car behaviour during collision with a barrier

The analysis of the course of car collision with a barrier usually allows to differentiate three stages of that process:

- preimpact motion of a car just before the beginning of a contact with a barrier;
- collision of a car and a barrier and a turn to a parallel position towards a barrier; the car motion energy is being dissipated and a car is being deformed;
- the end of the contact between a car and a barrier and independent car motion from a barrier [6].

Obviously, a course of some critical situation is more complex and can include car driving into a barrier, barrier rupture, car roll-over etc. Each stage of that process requires proper analysis and modelling methods. This work analyzes a course of the third stage, i.e. a car motion after the end of the car and barrier contact.

Modern concrete barriers make a complex of interconnected segments. Individual segments are rigid but their connection is a joint of a limited mobility. In Poland, full concrete barriers with "F" type side wall profile have been introduced. They are more safe for passenger cars than New Jersey profile used in some other countries [4, 11, 14].

The work [10] describes behaviour of a passenger car after hitting a barrier at low and medium driving speed values (up to 60 km/h). Usually, in case of impacts at the angle of 10 to 15 degrees, a course of car motion path is of sliding nature. However, it is difficult to predict the behaviour of cars after hitting a barrier at a high speed. Computer simulation of car collisions, performed in many research centres, is mostly focused on vehicles or barriers in the structural aspect. While there are few works dedicated to the analysis of car behaviour after collision with a barrier.

3. Research model and scope

A model of a car and barrier collision process have been created in PC Crash and Matlab software. It has been developed on the basis of results of observations of critical situations in the road traffic and analysis of arrangement of temporary concrete barriers. The model includes placing the barrier on different grounds as segments jointed in a form of a chain. Applied mathematical model of motion of a car hitting the barrier and barrier segment motion has been developed on the basis of works [8, 9, 12, 13]. Car collision and deformation process during the contact with the barrier is described using the Kudlich-Slibar model [9, 13]. That model is presented in [7].

Barrier parameters are selected on the basis of information provided by the manufacturers. 4m long segments of weight of

sworzniowym połączeniem o maksymalnej sile rozciągającej 350 kN. W pracy rozważa się uderzenia samochodów osobowych pod kątem do 24 stopni i z prędkością 80 – 110 km/h w prawidłowo zmontowaną barierę betonową.

Dobór warunków i zakresu badań oparto na PN EN 1317, która określa zasady przeprowadzania badań barier i ich kwalifikacji na podstawie wyników tych badań [12]. Podczas budowy modelu przyjęto następujące ustalenia:

- bariera betonowa jest złożona z 20 segmentów;
- samochody uderzające w barierę dobrano jako typowych przedstawicieli kategorii M1 z krajowego rynku, czyli o masie 900 kg (segment handlowy B) i o masie 1500 kg (segment handlowy C);
- występuje linia rozgraniczenia nawierzchni drogowej (rys. 4.1) z pasem o przyczepności $\mu = 0,8$ od równoległego pasa podłoża, na którym jest ustawiana bariera;
- podłoże, na którym ustawiana jest bariera, charakteryzowane jest współczynnikiem tarcia w przedziale $\mu_B = 0,2-0,8$.

Zbudowany model dynamiki uderzenia samochodu w barierę poddano weryfikacji poprzez odniesienie wyników obliczeń do rezultatów badań eksperymentalnych kilku różnych barier betonowych. W pracy [7] zestawiono wyniki obliczeń (przesunięcie poprzeczne bariery, rozpraszanie energii uderzenia) i badań eksperymentalnych, osiągając wysoką ich zgodność.

4. Wyniki obliczeń toru ruchu samochodu po uderzeniu w barierę

4.1. Informacje ogólne

Poniżej przedstawiono wskaźniki charakteryzujące przebieg toru ruchu samochodu po jego uderzeniu w barierę. Na rysunku 4.1 jest graficzne przedstawienie fragmentu procesu obliczeń uderzenia samochodu w barierę. Widoczne jest końcowe położenie bariery z „zamrożonymi” położeniami samochodu, które zaznaczono co 0,5 s. Samochód podczas obliczeń uderza w środek segmentu nr 10. Cienką linią zaznaczono przebieg wyznaczonego toru ruchu środka masy samochodu. Malejąca odległość między kolejnymi sylwetkami samochodu pokazuje spadek prędkości jego ruchu w wyniku rozpraszania energii w fazie kontaktu samochodu z barierą (deformacja nadwozia i praca przesunięcia bariery).

Charakterystyczne wskaźniki przebiegu toru ruchu środka masy samochodu pokazano na rysunkach 4.1 i 4.2, gdzie zaznaczono następujące wielkości:

- na rysunku 4.1 pokazano kąt β uderzenia samochodu w barierę i kąt γ odjechania (odejścia) toru od bariery,
- na rysunku 4.2 zaznaczono odległości A, B i C toru od bariery w położeniu początkowym.

2200 kg with a pin joint of maximum stretching force of 350 kN have been selected. The work considers passenger car collisions, at the angles of up to 24 degrees and at the speeds of 80 – 110 km/h, with a properly installed concrete barrier.

Selection of conditions and the scope of tests are based on PN EN 1317, which defines the rules of performing the barrier tests and barrier classification on the basis of the barrier test results [12]. The following arrangements were assumed when building the model:

- concrete barrier made of 20 segments;
- cars hitting the barrier selected as typical representatives of M1 category on the national market, i.e. weight of 900 kg (commercial segment B) and weight of 1500 kg (commercial segment C);
- there is a road surface demarcation line (fig. 4.1) with a lane adhesion $\mu = 0,8$ from the parallel strip of the ground where the barrier is placed;
- the ground, the barrier is placed on, is characterized with a friction factor within a scope of $\mu_B = 0,2-0,8$.

Developed model of the car and barrier collision dynamics have been verified by referring the calculation results to experimental test results involving the tests of several different concrete barriers. The work [7] compares the calculation results (transverse barrier displacement, impact energy dissipation) with the experimental test results, obtaining high consistence.

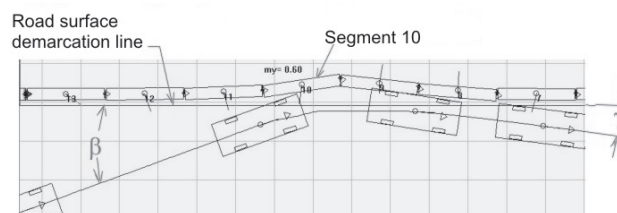
4. Results of car motion path calculation after collision with a barrier

4.1. General information

Indexes characterizing the course of car motion path after hitting a barrier are presented below. Figure 4.1 shows a graphic representation of a fragment of car and barrier collision calculation process. Final position of the barrier with "frozen" car positions, marked every 0,5 seconds can be seen. During calculations, the car hits the centre of segment no. 10. A course of determined path of the centre of car mass is marked with a thin line. Decreasing distance between the following car outlines indicates a drop of car motion speed due to energy dispersion during the car and barrier contact stage (car body deformation and barrier displacement).

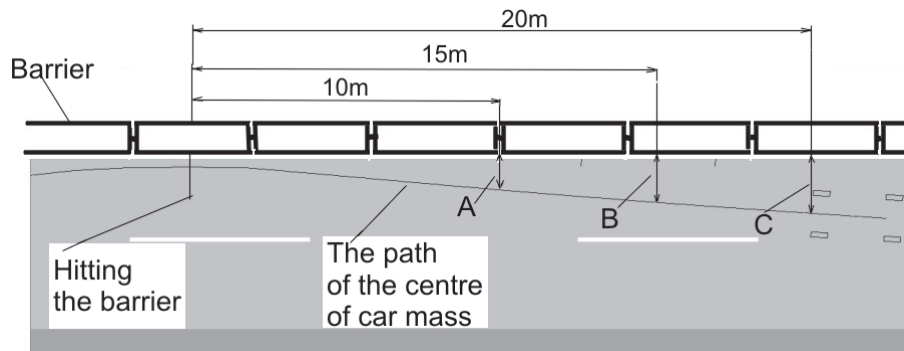
Characteristic indexes of the course of motion path of the centre of car mass are shown on figures 4.1 and 4.2, where the following values are indicated:

- figure 4.1 shows the angle β of the car and barrier collisions and the angle γ of path deflection from the barrier,
- figure 4.2 shows path distances A, B and C from the barrier in the initial position.



Rys.4.1. Położenie bariery po zakończeniu obliczeń wraz z naniesionym torem ruchu i sylwetkami pojazdu co 0,5s

Fig. 4.1. Barrier position after completion of calculations with marked motion path and vehicle outlines every 0.5 seconds



Rys. 4.2. Wymiary charakterystyczne, wykorzystywane podczas opisu toru ruchu środka masy samochodu po uderzeniu w barierę
Fig. 4.2. Characteristic dimensions used during description of the path of motion of the centre of car mass after hitting the barrier

4.2. Wpływ rodzaju podłoża, na którym ustawiono barierę, na tor jazdy samochodu

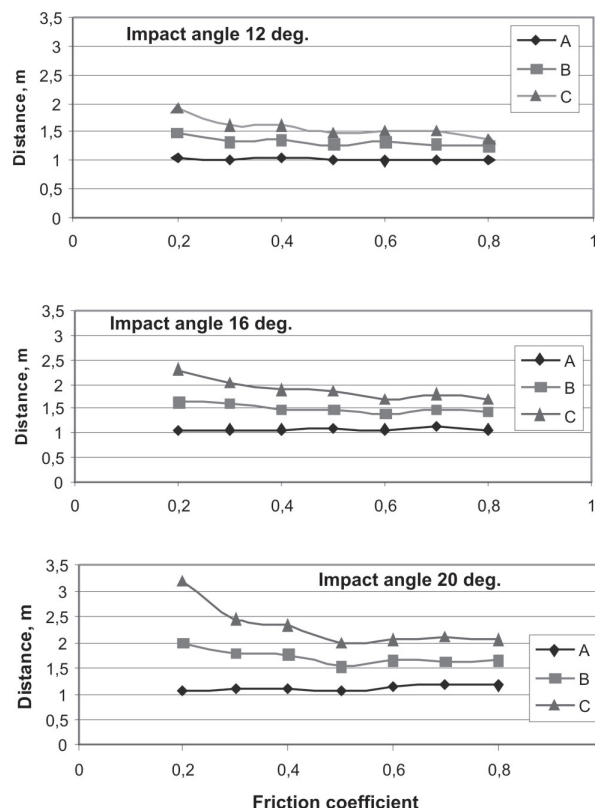
Na rysunku 4.3 pokazano wyniki obliczeń, charakteryzujące przebieg toru ruchu samochodu z segmentu handlowego C po uderzeniu w barierę z prędkością 80 km/h. Pokazano zależność odległości A, B i C od wartości współczynnika tarcia μ_B między barierą a podłożem dla trzech wartości kąta uderzenia samochodu. Obliczenia pokazują, że wpływ wartości współczynnika tarcia na odległość toru ruchu samochodu od bariery przy $\mu_B > 0,5$ jest mały.

Podczas normatywnych badań barier drogowych według [12] ocenie podlega odległość A, pokazana na rysunku 4.2, czyli tzw. odległość odsunięcia pojazdu od bariery. Ponieważ jest ona mierzona blisko początku kontaktu samochodu z barierą, to zmiany odległości A w zależności od tarcia między barierą a podłożem są niewielkie (por. rys. 4.3). Wartości odległości toru ruchu samochodu od bariery tuż po zakończeniu fazy kontaktu mało zależą od rodzaju podłoża, na którym ustawiono barierę. To ważna wskazówka eksploatacyjna. Zwykle ustawiając barierę tymczasową (a w tej roli dominują bariery betonowe) nie mamy dużej swobody w wyborze rodzaju podłoża. Tymczasowe bariery są ustawiane na nawierzchni asfaltowej, betonowej, na różnych podłożach gruntowych, a zimie także mogą być na podłożu oblodzonym lub zaśnieżonym.

Badania prowadzone przy wysokich prędkościach uderzenia charakteryzują się tym, że w fazie odjazdu od bariery (faza trzecia) samochód posia-

4.2. Influence of the barrier ground on the car driving path

Figure 4.3 shows the calculation results characterizing the course of motion path of a car from the C commercial segment after hitting the barrier at the speed of 80 km/h. A dependence of distances A, B and C on the friction coefficient μ_B between the barrier and the ground for three car impact angle values are shown. Calculations indicate that the influence of the friction coefficient value on the distance of the car motion path from the barrier at $\mu_B > 0,5$ is small.



Rys. 4.3. Przebieg zmian odległości A, B i C toru ruchu samochodu od bariery, zależnie od wartości współczynnika tarcia μ_B

Fig. 4.3. The course of variations of A, B and C distance of the car motion path from the barrier, depends on the friction coefficient value μ_B

During standard road barrier tests, according to [12], distance A, shown on figure 4.2, i.e. the so-called distance of pushing a car away from the barrier, is evaluated. As it is measured close to the beginning of the car and barrier contact, the distance A variations, depending on the friction between the barrier and the ground, are low (compare fig. 4.3). Values of the car motion path distance from the barrier just after the end of the contact stage hardly depend on the ground the barrier is placed on. It is an important operational tip. Usually, when placing a temporary barrier (mostly the concrete barriers) we are not free to choose a type of the ground. Temporary barriers are placed on the tarmac or concrete surface, on various soil grounds and during the winter season they can be placed on icy or snow-covered grounds.

Tests performed at high impact velocities are characterized by a high car speed [14] at the stage of car deflection from the barrier (third stage). Then, the measures to push the car

da jeszcze znaczną prędkość [14]. Zatem miary odsunięcia toru ruchu samochodu od bariery położone dalej niż A, oznaczone B i C na rys. 4.2, mają ważne znaczenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego. Odległości B i C są zdecydowanie wyższe niż A (por. rys. 4.3) i wyraźnie maleją wraz z narastaniem wartości współczynnika tarcia z przedziału $\mu_B = 0,2-0,5$.

4.3. Wpływ kąta uderzenia samochodu na odległość toru jego ruchu od bariery

Na podstawie analizy wypadków drogowych można przyjąć, że najczęściej występujące wartości kąta najazdu (uderzenia) samochodu na bariery drogowe mieszczą się w przedziale 5 – 10 stopni [2, 3, 6]. Z kolei podczas europejskich badań barier drogowych [12], przyjmuje się wartości kąta najazdu w granicach 8 – 20 stopni. Oczywiście, przy zerowej wartości kąta uderzenia, odległość toru ruchu samochodu od bariery powinna być równa połowie szerokości samochodu. Szerokość tę, na podstawie bazy danych technicznych w programie PC Crash, przyjęto równą 1,7m dla wszystkich samochodów branżowych do obliczeń.

Kolejne obliczenia przeprowadzono w celu pokazania wpływu wartości kąta uderzenia samochodu na odległość A, toru ruchu środka masy samochodu od bariery. Na rysunku 4.4 zestawiono wyniki obliczeń dla trzech wartości współczynnika tarcia $\mu_B = 0,3; 0,5$ i $0,7$, które odnoszą się do następujących samochodów oraz prędkości uderzenia:

- samochody z segmentu B, $v=100$ km/h;
- samochody z segmentu C, $v=80 - 110$ km/h.

Jednocześnie na rysunku są widoczne przebiegi wielomianu drugiego stopnia, aproksymującego zależność odległości A toru ruchu samochodu od kąta uderzenia w barierę. Model tej zależności dla analizowanych samochodów można opisać funkcją (tabela 4.1):

motion path away from the barrier positioned further than A, marked with B and C on fig. 4.2, are of high significance for the road traffic safety. Distances B and C are significantly higher than A (compare fig. 4.3) and clearly decrease together with the increase of the friction coefficient from the range of $\mu_B = 0,2-0,5$.

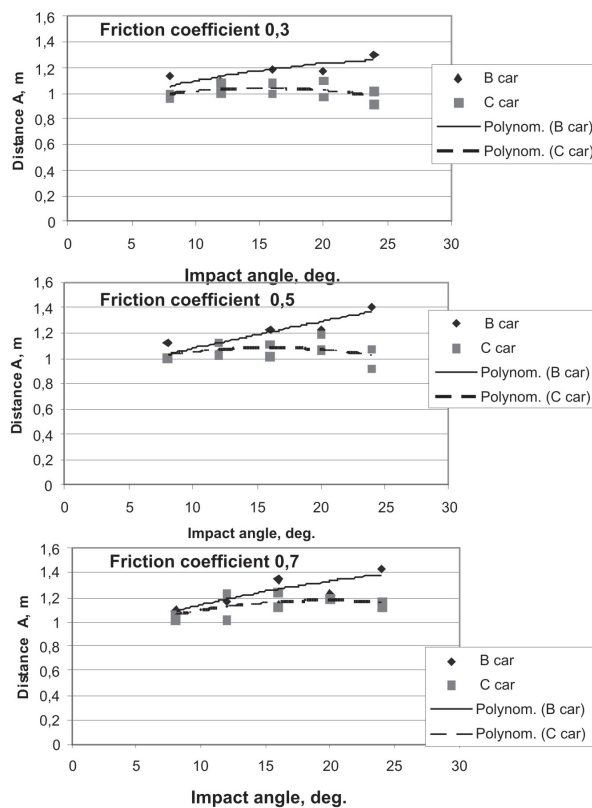
4.3. The influence of the car impact angle on the car motion path distance from the barrier

On the basis of the road accident analysis, it can be assumed that the most often values of the car run-into angle (car impact angle) fall between 5 and 10 degrees [2, 3, 6]. While during the European road barriers tests [12], the angle values between 8 – 20 degrees are assumed. Obviously, at the zero car impact angle value, car motion path distance from the barrier should equal half car width. On the basis of the technical database in PC Crash software, that width has been assumed as 1,7m for all cars included in calculations.

Further calculations have been carried out in order to indicate the influence of the car impact angle values on the distance A, path of motion of the car centre of mass from the barrier. Figure 4.4 compares the calculation results for three friction coefficient values $\mu_B = 0,3; 0,5$ and $0,7$, that refer to the following cars and impact velocities:

- cars from segment B, $v=100$ km/h;
- cars from segment C, $v=80 - 110$ km/h.

Simultaneously, the figure shows courses of the secondary polynomial, approximating dependence of distance A: car motion path from the barrier. Model of that dependence for analyzed cars can be described with a function (table 4.1):



Rys. 4.4. Wyniki obliczeń i aproksymacja zależności odległości A toru ruchu samochodu od kąta jego uderzenia w barierę

Fig. 4.4. Calculation results and approximation of dependence of distance A of the car motion path from its barrier impact angle

Tab. 4.1. Zestawienie funkcji aproksymujących (1) zależność odległości A od kąta uderzenia samochodu w barierę; gdzie y jest odległością w metrach, a β jest wartością kąta uderzenia w stopniach

Tab. 4.1. Comparison of approximating functions (1), dependence of distance A from the car impact angle; where y is a distance in metres and β is impact angle value in degrees

Współczynnik tarcia Friction coefficient	Samochód z segmentu B Car from segment B	Samochód z segmentu C Car from segment C
0,3	$y = -0,0005 \beta^2 + 0,03 \beta + 0,85$	$y = -0,0008 \beta^2 + 0,02 \beta + 0,85$
0,5	$y = -0,00008 \beta^2 + 0,02 \beta + 0,85$	$y = -0,0009 \beta^2 + 0,03 \beta + 0,85$
0,7	$y = -0,0005 \beta^2 + 0,03 \beta + 0,85$	$y = -0,0008 \beta^2 + 0,03 \beta + 0,85$

$$y = -a_2\beta^2 + a_1\beta + a_0 \quad (1)$$

w której wartości współczynników zależą od μ_B i masy samochodu, ale mieszczą się w wąskich granicach:

$$a_2 \in (0,00008, 0,0009); a_1 \in (0,2, 0,3); a_0 = \beta/2 \quad (2)$$

a b jest szerokością samochodu.

Maksimum odległości toru ruchu samochodu z segmentu C widoczne jest przy kącie uderzenia ok. 16 stopni i występuje praktycznie niezależnie od wartości współczynnika tarcia μ_B . Obserwacja zmian odległości A toru ruchu samochodów z segmentu B pozwala wnioskować, że maksimum takie wystąpić może przy kącie uderzenia nieco powyżej 24 stopni. Zbudowane modele analitycznej zależności odległości A od kąta β w postaci wielomianu drugiego stopnia przechodzą przez punkt 0,85 m przy zerowym kącie uderzenia, co odpowiada ruchowi samochodu wzdłuż krawędzi bariery.

4.4. Zależność odległości toru ruchu samochodu od energii jego uderzenia w barierę

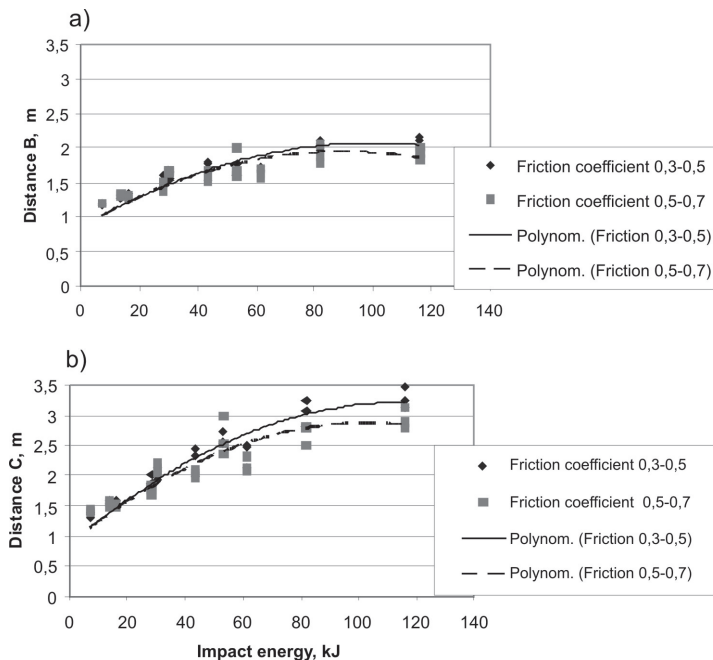
Podczas analizy toru ruchu samochodu w fazie odjazdu od bariery poszukuje się bardziej ogólnej relacji. W tym celu wybrano wartość energii uderzenia samochodu w barierę, jako czynnik o ogólnym charakterze i jednocześnie bezpośrednio związany z ruchem drogowym. Wartość tej energii zależy od masy m i prędkości samochodu v oraz kąta jego uderzenia β :

$$E_U = \frac{1}{2} m(v \sin \beta)^2 \quad (3)$$

i jest niekiedy traktowana jako wskaźnik IS (Impact Severity) [3, 6, 10], który ułatwia porównywanie zachowania się bariery drogowej w różnych sytuacjach drogowych.

Poniżej pokazano zależność odległości B i C toru ruchu środka masy samochodu od energii jego uderzenia w barierę. Zmiany odległości A są bardzo małe i nie pokazano ich na oddzielnym rysunku.

Na rysunku 4.5 umieszczono wyniki obliczeń przeprowadzonych dla samochodów o masie 900 - 1500 kg, które uderzały w barierę z prędkością 80 - 110 km/h. Łącznie na każdej części rysunku umieszczono po 45 punktów obliczeniowych. Poszukując ogólnej zależności odległości B i C od energii uderzenia, punkty na rysunku 4.5, podzielono na dwie grupy, a mianowicie dla $\mu_B = 0,3 - 0,5$ i $0,5 - 0,7$.



Rys. 4.5. Wyniki obliczeń i przebieg funkcji aproksymującej zależność odległości toru ruchu samochodu od energii jego uderzenia w barierę w dwóch przedziałach wartości współczynnika tarcia; a – odległość B, b – odległość C

Fig. 4.5. Calculation results and the course of function approximating the dependence of the car motion path distance on the barrier impact energy in two ranges of friction coefficient values; a – distance B, b – distance C

$$y = -a_2\beta^2 + a_1\beta + a_0 \quad (1)$$

where the coefficient values depend on μ_B and the car mass but fall into narrow limits:

$$a_2 \in (0,00008, 0,0009); a_1 \in (0,2, 0,3); a_0 = \beta/2 \quad (2)$$

and b makes the car width.

The maximum distance of the motion path of a segment C car is visible at the impact angle of app. 16 degrees and it occurs practically independent of the friction coefficient value μ_B . Observation of variations of distance A of the motion path of the segment B cars allows to make a conclusion that such maximum can occur at the impact angle slightly above 24 degrees. Developed models of analytical dependence of distance A from the angle β in a form of secondary polynomial cross the point 0,85m at the zero impact angle and it corresponds to the car motion along the barrier edge.

4.4. Dependence of the car motion path distance on the barrier impact energy

During the analysis of the car motion path at the stage of deflection from the barrier more general relation is sought. Therefore the car impact energy value was selected as a factor of general nature and directly related to the road traffic at the same time. The energy depends on the weight (m) and speed (v) of the vehicle and the approach angle (β):

$$E_U = \frac{1}{2} m(v \sin \beta)^2 \quad (3)$$

This energy is sometimes used as the Impact Severity (IS) factor [3, 6, 10] to facilitate comparison of barrier behaviour in various scenarios. Dependence of distances B and C of the motion path of the car centre of the mass on the barrier impact energy

is shown below. Variations of distance A are very small and they are not shown on a separate figure.

Figure 4.5 shows the results of calculations carried out for the cars of weight of 900 - 1500 kg, that hit the barrier at the speed of 80- 110 km/h. In total, each part of the figure includes 45 calculation points. Searching for general dependence of distance B and C on the impact energy, points on figure 4.5, were divided into two groups, that is for $\mu_B = 0,3 - 0,5$ i $0,5 - 0,7$. Analytical approximation of those results was made and the most favourable

Dokonano analitycznej aproksymacji tych wyników i najkorzystniejsze wartości współczynnika zbieżności R^2 osiągnięto przy zastosowaniu wielomianu drugiego stopnia. Nieliniowy przebieg tej zależności opisuje wielomian o postaci:

$$y = -a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (4)$$

przy następujących wartościach współczynników a_1 i a_2 (tabela 4.4):

- $a_1 = 0,024-0,025$, $a_2 = 0,0001$ dla odległości B w metrach,
- $a_1 = 0,039-0,041$, $a_2 = 0,0002$ dla odległości C w metrach,

który największe wartości odległości B i C osiąga przy energii uderzenia:

- powyżej 100 kJ dla $\mu_B = 0,3 - 0,5$;
- 80 – 100 kJ dla $\mu_B = 0,5 - 0,7$.

Tab. 4.4. Funkcje aproksymujące zależność odległości B i C toru ruchu samochodu od energii jego uderzenia w barierę; y jest odległością w metrach, a x jest energią uderzenia w kJ

Tab. 4.4. Functions approximating dependence of distance B and C of the car motion path on the impact energy; where y is a distance in metres and x is the impact energy in kJ

Tarcie / Friction coefficient	Odległość B / Distance B	R^2	Odległość C / Distance C	R^2
0,3- 0,5	$y = -0,0001x^2 + 0,024x + 0,85$	0,805	$y = -0,0002x^2 + 0,041x + 0,85$	0,906
0,5 -0,7	$y = -0,0001x^2 + 0,025x + 0,85$	0,658	$y = -0,0002x^2 + 0,039x + 0,85$	0,793

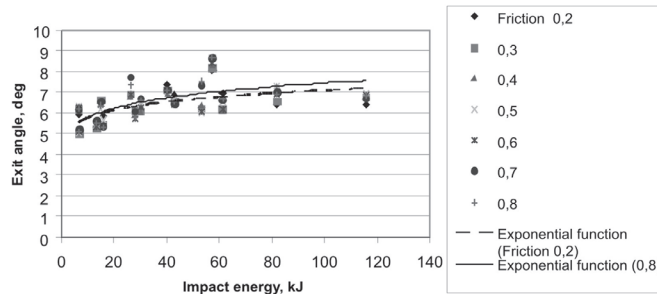
4.5. Kąt odejścia toru ruchu samochodu po uderzeniu w barierę

Interesującym wskaźnikiem do analizy toru ruchu samochodu jest kąt odejścia γ toru ruchu środka masy, obliczony na początkowym odcinku toru jego odjazdu od bariery (rys. 4. 1). Wartość tego kąta może wskazywać na dalszy przebieg toru jazdy samochodu po uderzeniu w barierę, gdy deformacje pojazdu nie są znaczne. Przy znacznych deformacjach pojazdu jego tor ruchu może być mało stabilny.

Wyniki obliczeń, zestawione na rysunku 4.6 pokazują, że wartości kąta odejścia toru ruchu samochodu mieszczą się w przedziale 5 – 9 stopni przy uderzeniu samochodów z segmentu B i C w barierę z energią 10 – 120 kJ pod kątem do 24 stopni. Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem wielu różnych podłoży, na których można ustawiać bariery betonowe. Na rysunku 4.6 zaznaczono też przebieg funkcji aproksymującej wyniki obliczeń dla wartości $\mu_B = 0,2$ i $0,8$. Podczas poszukiwania funkcji aproksymującej, największe wartości współczynnika zbieżności R^2 uzyskano dla funkcji wykładniczej:

$$\gamma = ax^b \quad (5)$$

w której kąt γ jest w stopniach, a x energią uderzenia w kJ oraz wartości współczynników:



Rys. 4.6. Wyniki obliczeń wartości kąta odejścia toru ruchu samochodu dla $\mu_B = 0,2 - 0,8$ w zależności od energii uderzenia w barierę

Fig. 4.6. Results of calculations of the car motion path deflection angle values for $\mu_B = 0,2 - 0,8$ depending on the barrier impact energy

values of the convergence coefficient R^2 were obtained applying the secondary polynomial. Nonlinear course of that dependence is described by a polynomial in the form:

$$y = -a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (4)$$

at the following values of coefficients a_1 i a_2 (table 4.4):

- $a_1 = 0,024-0,025$, $a_2 = 0,0001$ for distance B in metres;
- $a_1 = 0,039-0,041$, $a_2 = 0,0002$ for distance C in metres

and the highest values of distance B and C are obtained at the following impact energy:

- above 100 kJ for $\mu_B = 0,3 - 0,5$;
- 80 – 100 kJ for $\mu_B = 0,5 - 0,7$.

4.5. Car motion path deflection angle after hitting the barrier

Angle of deflection γ of the motion path of the centre of mass, calculated at the initial section of the path of deflection from the barrier, makes an interesting index for the car motion path analysis (fig. 4.1). Value of that angle can indicate further course of car motion path after hitting the barrier, when the car deformations are minor. In case of considerable vehicle deformations, its motion path can be unstable.

Calculation results, compared on figure 4.6 show that the values of the car motion path deflection angle fall between 5 and 9 degrees when the cars from segments B and C hit the barrier with energy 10 – 120 kJ at the angle of up to 24 degrees. Calculations were carried out considering many different grounds the concrete barriers can be placed on. Figure 4.6 also shows a course of a function approximating the results of calculations for the value $\mu_B = 0,2$ and $0,8$. When searching for the approximating function, the highest values of the convergence coefficient R^2 were obtained for the exponential function:

$$\gamma = ax^b \quad (5)$$

where γ is the angle in degrees and x is the impact energy in kJ and the values of coefficients:

$$a \in (4,47, 4,67); \quad b \in (0,09, 0,11) \quad (2)$$

Uśredniony model procesu zmiany tego kąta dla skrajnych wartości współczynnika tarcia μ_b wskazuje na niewielkie tempo jego wzrostu wraz ze wzrostem energii uderzenia samochodu w barierę.

Warto tu dodać, że obliczenie kąta γ nie sprawia problemu, gdy przebieg toru ruchu samochodu w fazie po zderzeniowej jest prawie liniowy. Jednak rotacja, którą samochód może uzyskać w końcowej fazie dynamicznego oddziaływania bariery na tył samochodu oraz często znaczna deformacja samochodu powodują nieregularny przebieg toru jego ruchu w fazie po zderzeniowej.

Otrzymaną postać funkcji aproksymującej wykorzystano na etapie porównania wyników badań eksperymentalnych z obliczeniami w tabeli 4.5. Poszukując możliwości porównania wyników obliczeń z rezultatami testów eksperymentalnych, wykorzystano prace [1, 2]. Zamieszczono tam wyniki badań samochodów w zakresie możliwym do porównania z obliczeniami. Biorąc pod uwagę opisany wyżej charakter przebiegu toru ruchu samochodu i obliczone na jego podstawie wartości kąta odejścia, uzyskano dobrą zgodność wartości kąta odejścia w testach eksperymentalnych z rezultatami wyliczonymi na podstawie przebiegu funkcji aproksymującej, jak na rysunku 4.6.

Tab. 4.5. Przykład zestawienia wyników obliczeń z eksperymentem
Tab. 4.5. An example of comparison of calculation results with the experiment

Samochód, typ, masa Vehicle mass, type	Kąt uderzenia, stopnie Impact angle, deg.	Prędkość uderzenia km/h Impact speed, km/h	Energia uderzenia kJ Impact energy kJ	Kąt odejścia, stopnie Exit angle, deg.	Kąt odejścia obliczony z funkcji aproksymującej na rysunku 4.6, stopnie Exit angle – calculated using the approximation from figure 4.6, deg.	Źródło, uwagi References
Toyota Echo 880	19,9	78	47,8	7		[2], eksperyment [2], experiment
Samochód 900 kg Car, mass 900 kg	20	80	52,0	--	6,8	Obliczenia własne Calculation
Geo Metro 910 kg	20	70,6	40,5	5		[1], eksperyment [1], experiment
Samochód 900 kg Car, mass 900 kg	20	70	39,8	--	6,6	Obliczenia własne Calculation

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczą bezpieczeństwa ruchu drogowego. Pozwalają na wszechstronną ocenę wpływu parametrów ruchu samochodu oraz rodzaju podłoża, na którym ustawiono barierę betonową, na przebieg toru ruchu samochodów w sytuacjach krytycznych, czyli po uderzeniu w barierę drogową. Rozważono zachowanie się samochodów osobowych z segmentu handlowego B i C, czyli najczęściej występujących na naszych drogach. Analizie poddano zmiany odległości toru ruchu środka masy samochodu oraz kąta odejścia tego toru od krawędzi bariery. Dokonano analitycznej aproksymacji zależności wielkości charakteryzujących tor ruchu samochodu od energii uderzenia samochodu w barierę.

Wartości podstawowej miary odległości toru ruchu samochodu od bariery (oznaczenie A) zależą przede wszystkim od kąta uderzenia β . Wyniki obliczeń, przeprowadzonych dla uderzenia samochodów o masie 900 kg, zestawione na rysunku 4.4 pokazują, że w tych warunkach odległość A wynosi od 1,1

$$a \in (4,47, 4,67); \quad b \in (0,09, 0,11) \quad (2)$$

Averaged model of the angle variation process for extreme values of the friction coefficient μ_b indicates a small paste of its increase together with the car impact energy increase.

It is worth adding that calculation of the angle γ does not make any problem when the course of the car motion path at the impact stage is almost linear. But the rotation that a car can get at the final stage of dynamic barrier action on the rear part of a car and significant car deformation result in irregular course of the car motion path at the impact stage.

Obtained form of the approximating function was used at the stage of comparison of the experimental test results with the calculations in table 4.5. Looking for the possibilities of comparing the calculation results with the experimental test results, the following works have been used [1, 2]. They include car test results within a scope which can be compared to the calculations. Considering the nature of the car motion path described above and the deflection angle values, calculated based on it, good conformity of the deflection angle values in the experimental tests with the results calculated on the basis of the course of approximating function, as shown on figure 4.6, has been obtained.

5. Summary

Performed tests concern the road traffic safety issue. They allow to provide versatile evaluation of the influence of car motion parameters and a type of ground underneath the concrete barrier on the course of the car motion path in critical situations, that is after hitting the road barrier. Behaviour of passenger cars from commercial segments B and C have been considered, i.e. the most common cars on our roads. Variations of distances of the motion path of the car centre of mass and the angle of the path deflection from the barrier edge have been analyzed. Analytical approximation of dependence of the values characterizing the car motion path on the car impact energy has been performed.

Values of the basic measure of the car motion path distance from the barrier (marked with A) first of all depend on the impact angle β . Results of calculations performed for the impact of cars of weight of 900 kg, specified on figure 4.4 show that under those conditions the distance A amounts to 1,1 - 1,4 m

do 1,4 m i nieznacznie rośnie wraz ze wzrostem kąta uderzenia w zakresie 8 – 24 stopnie. Natomiast maksimum odległości A toru ruchu samochodu o masie 1500 kg występuje przy kącie uderzenia ok. 16 stopni. Niewielkie różnice w przebiegu zmian odległości A dla samochodów o masie 900 i 1500 kg wynikają z wartości energii ich uderzenia w barierę. Większa energia uderzenia samochodu z segmentu C niż B powoduje, że bariera ulega przesunięciu na większej długości (większa tzw. długość pracująca bariery) ale głębokość tego przesunięcia nie jest duża (efekt łańcucha) i stąd tor ruchu samochodu C jest bliższy bariery niż samochodu B. To potwierdzają także nieliniowe przebiegi zależności odległości B i C toru ruchu samochodów o masie 900 – 1500 kg, na których (rys. 4.5) widoczne jest maksimum odległości przy energii uderzenia 70 – 90 kJ w barierę ustawioną na podłożu o $\mu_B = 0,5 - 0,7$.

Uzyskane wyniki pokazują możliwości planowania bezpiecznego ustawiania barier betonowych (przestawnych) na różnych podłożach, kształtowania strefy zagrożenia wynikającego z ruchu samochodów po uderzeniu w barierę oraz mogą stanowić podstawę rekonstrukcji wypadków drogowych.

and slightly increases together with the impact angle increase within a scope of 8 – 24 degrees. However the maximum motion path distance A of the 1500 kg car occurs at the impact angle of app. 16 degrees. Small differences in the course of distance A variations for the 900 kg and 1500 kg cars result from the value of their impact energy. Higher impact energy of a car from the segment C than a B segment car results in longer barrier displacement (higher working length of the barrier) but the depth of that displacement is rather small (chain effect) and therefore the motion path of a C segment car is closer to the barrier than in case of a B segment car. It is also confirmed by nonlinear courses of dependence of the motion path distances B and C of the cars of weight of 900 – 1500 kg, where (fig. 4.5) the maximum distance, at the impact energy of 70 – 90 kJ during collision with the barrier placed on the ground of $\mu_B = 0,5 - 0,7$, is visible.

Obtained results indicate a possibility of planning safe arrangement of the concrete (movable) barriers on different grounds, shaping the danger zone resulting from the car motion after hitting the barrier and they can also make the basis for the road accident reconstruction.

*Praca naukowa, finansowana ze środków na naukę w latach 2007 – 2010 jako projekt rozwojowy
Research study financed from funds for science in years 2007 – 2010 as a development project.*

6. References

1. Consolazio G. R., Chung J. H., Gurley K. R., Impact simulation and full scale crash testing of a low profile concrete work zone barrier, *Computers and Structures* 2003, 81: 1359 – 1374.
2. Grzebieta R. H., Zou R., Corben B., Judd R., Kulgren A., Tingval C., Powell C., Roadside Crash Barrier Testing, *Proceedings ICRAASH*, Melbourne 2002.
3. Grzebieta R. H., Zou R., Jiang T., Carey A., Roadside Hazard and Barrier Crashworthiness Issues Confronting Vehicle and Barrier Manufactures and Government Regulators, 19 Conference ESV, Washington 2005.
4. Mikołajków L., Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego w polskiej praktyce drogowej, *Infrastruktura* 2006, nr 1-2.
5. Minton R. C., Cuenden R., Behaviour of SUV and MPV- type Vehicles in Collisions with Roadside Safety Barriers, 20 Conference ESV, Lyon 2007.
6. Navin F., Kłymchuk R., Romilly D., Thomson R., Reconstruction of Accidents Involving Highway Barriers, SAE 930656.
7. Prochowski L., Analysis of Displacement of Concrete Barrier on Impact of a Vehicle. Theoretical Model and Experimental Validation, *Journal of KONES 2010 Powertrain and Transport*, Vol. 17 no 4, Pub. Permanent Committee of KONES, Warsaw 2010.
8. Prochowski L., Pojazdy samochodowe *Mechanika ruchu*, Warszawa: WKiŁ, wyd. II, 2008.
9. Prochowski L., J. Unarski, W. Wach, J. Wicher, Pojazdy samochodowe, *Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych*, Warszawa: WKiŁ, 2008.
10. Ross H. E., Sicking D. L., Zimmer R. A., Michie J. D., Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features, NCHRP Report 350, National Academy Press, Washington 1993.
11. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.
12. Systemy ograniczające drogę - część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań; część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych, PN – EN 1317.
13. Wach W., Symulacja wypadków drogowych w programie PC Crash, Kraków, IES 2009.
14. Wicher J., Prochowski L., Pochłanianie energii i zmniejszenie prędkości ruchu samochodu w czasie uderzenia w barierę drogową, IV Konferencja naukowo-szkoleniowa Rozwój Techniki Samochodowej a Ubezpieczenia Komunikacyjne, Radom 2008.

Prof. Leon PROCHOWSKI

Faculty of Mechanics

Military University of Technology

Sylwestra Kaliskiego Street, 00-908 Warszawa

e-mail: lprochowski@wat.edu.pl
