

WPLYW ZMIENNOŚCI MASY JEDNEGO Z POJAZDÓW NA NIEBEZPIECZEŃSTWO ZEJŚCIA KOŁA Z SZYNY PODCZAS ZDERZENIA CZOŁOWEGO

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Analiza danych statystycznych dotyczących zderzeń czołowych i zderzeń przy najechaniu, według badań amerykańskich i europejskich
3. Ocena bezpieczeństwa ruchu pojazdu w warunkach zderzenia. Kryterium Nadala
4. Zderzenie mimośrodowe dwóch ciał o stałej masie — analiza kinematyczna
5. Opis eksperymentalnego zderzenia wagonu kolejowego, załadowanego piaskiem, z pojazdem doświadczalnym
6. Porównanie niektórych wyników eksperymentu z wynikami obliczeń zderzenia dwóch pojazdów o stałych masach
7. Propozycje dalszych prac prowadzących do oceny bezpieczeństwa ruchu pociągu ze względu na wykolejenie

STRESZCZENIE

W artykule przytoczono wyniki statystycznych badań wypadków kolejowych, polegających na wykolejeniu i kolizji pojazdów. Omówiono warunki sprzyjające zejściu koła z szyny w uderzonym wagonie. Przeprowadzono analizę kinematyczną zderzenia mimośrodowego dwóch ciał o stałej masie i wyznaczono parametry charakteryzujące to zderzenie. Opisano eksperymentalne zderzenie wagonu załadowanego piaskiem z pojazdem doświadczalnym; porównano wyniki pomiarów z wynikami obliczeń zderzenia pojazdów o stałej masie. Stwierdzono, że układ eksperymentalny zachował się podczas zderzenia tak, jakby masa piasku zmieniała swoją wartość.

1. WPROWADZENIE

Dwa typy wypadków kolejowych są przyczyną szczególnie dotkliwych strat. Zderzenia czołowe (*head on collision*), gdy dwa pojazdy poruszają się na tym samym torze w

przeciwnych kierunkach, oraz zderzenia przy najechnaniu (*rear end collision*), gdy dwa pojazdy poruszają się w tym samym kierunku z różnymi prędkościami. Drugim typem wypadków powodujących wysokie straty są wykołnienia któregoś z pojazdów w składzie pociągu. W artykule omówiono przebieg i skutki zderzenia dwóch pojazdów.

2. ANALIZA DANYCH STATYSTYCZNYCH DOTYCZĄCYCH ZDERZEŃ CZOŁOWYCH I ZDERZEŃ PRZY NAJECHANIU, WEDŁUG BADAŃ AMERYKAŃSKICH I EUROPEJSKICH

Ze względu na brak wiarygodnych i wieloletnich danych, dotyczących zderzeń na torach PKP, przytoczono wyniki analizy takich danych zebranych na kolejach amerykańskich w okresie 1960—1979 r. [1]. Badania te dotyczyły m.in. „Identyfikacji przeszłych i obecnych historii wypadków kolejowych obejmujących wszystkie typy wypadków, szczególnie zaś zderzeń czołowych oraz zderzeń przy najechnaniu”.

W badaniach amerykańskich przyjęto podział wypadków pociągowych przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Podział wypadków pociągowych według badań amerykańskich

Wypadki grupy A, czyli wykołnienia bez kolizji, stanowiły 72,5% wszystkich wypadków pociągowych. Wypadki grupy B, czyli wypadki połączone z kolizją — 18,4%; natomiast inne wypadki — 9,1%.

W analizie wypadków grupy B przyjęto następujące podgrupy:

- kolizje na rozjazdach — 61,9% wszystkich kolizji,
- zderzenia boczne i kolizje z obiektami znajdującymi się na torze — 20,6%,
- zderzenia przy najechnaniu — 5,8%,
- zderzenia czołowe — 2,9%,
- zderzenia przy rozerwaniu pociągu — 2,7%,
- inne kolizje — 6,1%.

W wypadkach grupy A śmierć poniosło 23% wszystkich ofiar śmiertelnych kolejowych wypadków pociągowych, a w grupie B — 11%. Udziały procentowe rannych w wypadkach poszczególnych grup wynosiły: A — 46%, grupy B — 35%, grupy C — 19%.

Koszty odszkodowań i napraw spowodowane przez kolizje i wykołnienia rosły z roku na rok, lecz ich stosunek nie zmieniał się i wynosił około 0,15. Koszty odszkodowań i napraw w wyniku wypadków w podgrupach: zderzenia czołowe i zderzenia przy najechnaniu stanowiły około 40% kosztów odszkodowań i napraw spowodowanych wszystkimi innymi wypadkami grupy B.

Z przytoczonych danych wynika, że zderzenia czołowe oraz zderzenia przy najechaniu były ważnym rodzajem wypadków pociągowych zarówno pod względem strat w ludziach, jak i strat materialnych. Znaczenie obu tych podgrup wypadków jest tym większe, że mogą powodować wykołnienie zderzających się pojazdów.

Badania statystyczne dotyczące kolizji pociągów w Europie [6] doprowadziły do podziału wypadków na grupy, w zależności od ich rodzaju, częstości występowania, energii zderzenia oraz skutków dla zdrowia ofiar kolizji.

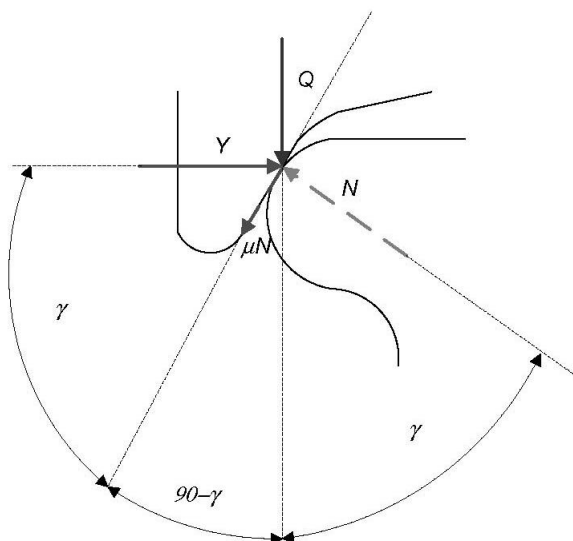
Wyniki analizy tych badań są, między innymi, następujące: około 95% kolizji pociągowych wystąpiło przy prędkości mniejszej od 60 km/h. Doznane uszkodzenia ciała zależą głównie od energii zderzenia, przyspieszenia zderzających się pojazdów podczas zderzenia oraz czasu trwania maksymalnego przyspieszenia.

Analiza kolizji w okresie 1984—1993 r. wykazała, że ponad 60% ofiar śmiertelnych i poważnych uszkodzeń ciała to skutki kolizji, w których przód pojazdu uderzył w inny pojazd (zderzenia przy najechaniu).

Około 40% wszystkich zderzeń, to zderzenia z innym pojazdem szynowym, w których czoło pojazdu uderza w czoło innego pojazdu, jak i te zderzenia, gdy przód uderza w tył innego pojazdu (zderzenia czołowe plus zderzenia przy najechaniu).

3. OCENA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU POJAZDU W WARUNKACH ZDERZENIA. KRYTERIUM NADALA

Rozpatrywany jest układ sił działających w punkcie styku obrzeża koła i szyny podczas poprzecznego ślizgania się obrzeża po szynie, a więc w warunkach unoszenia się koła nad szyną. Na rysunku 2 pokazano siły występujące w punkcie styku obrzeża koła prowadzącego z główką szyny.



Rys. 2. Siły w punkcie styku koła i szyny

Z warunków ich równowagi otrzymuje się:

$$Y - \mu N \cos \gamma - N \sin \gamma = 0$$

$$Q + \mu N \sin \gamma - N \cos \gamma = 0$$

skąd $Y = N \sin \gamma + \mu N \cos \gamma,$

$$Q = N \cos \gamma - \mu N \sin \gamma$$

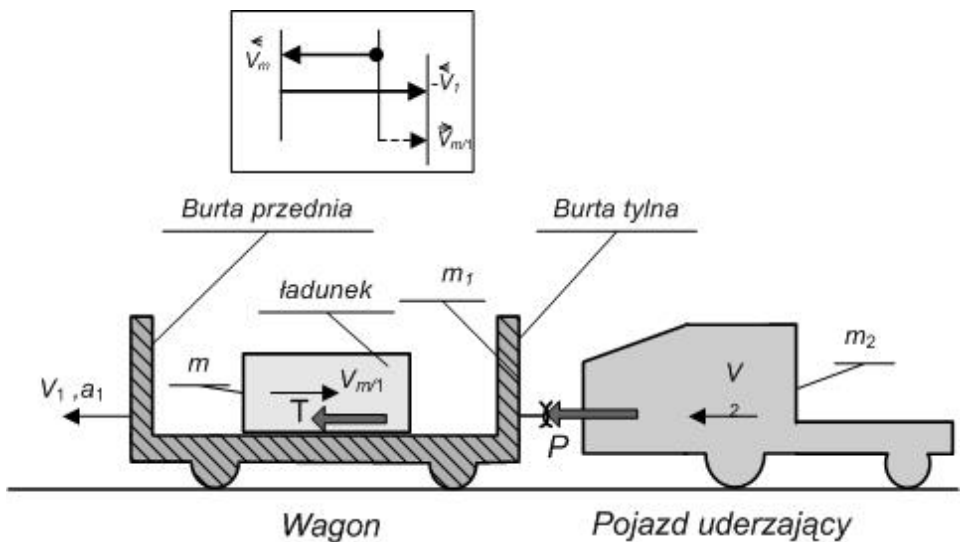
oraz
$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg} \gamma + \mu}{1 - \mu \operatorname{tg} \gamma}$$

Z powyższego wzoru, na podstawie licznych badań doświadczalnych, wyprowadza się kryterium oceny niebezpieczeństwa zejścia koła z szyny [3].

Gwarancją bezpieczeństwa przeciwko wykolejeniu jest spełnienie warunku: $\frac{Y}{Q} \leq 1,2$

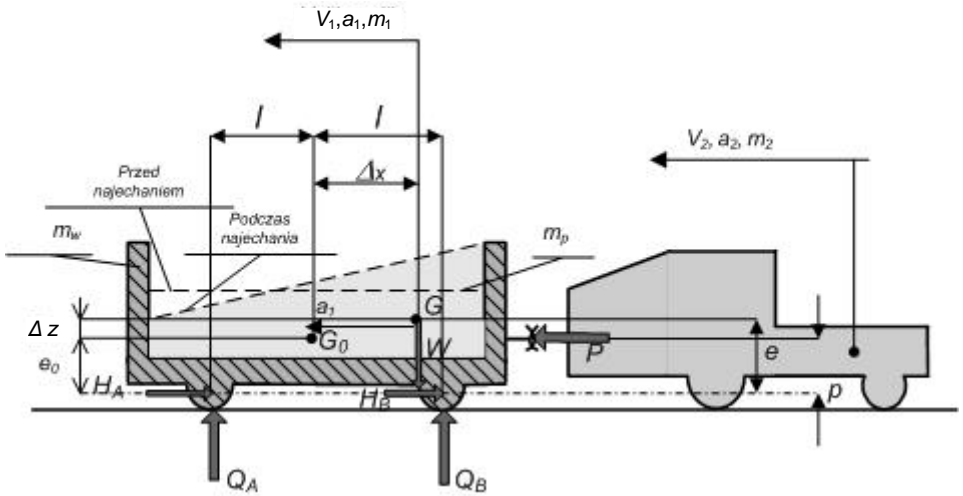
Wartość graniczną stosunku $\frac{Y}{Q}$, równą 1,2, uzyskano dla kąta pochylenia obrzeża $\gamma = 70^\circ$ oraz współczynnika tarcia $\mu = 0,36$. Jak widać, niebezpieczeństwo zejścia koła z szyny jest tym większe, im mniejszy jest nacisk Q i większa siła bocznego nacisku Y .

Podczas najechania innego pojazdu na tylne zderzaki wagonu załadowanego ładunkiem o masie m , na wagon działa siła uderzenia P , która nadaje wagonowi zarówno przyspieszenie liniowe a_1 , jak i przyspieszenie kątowe dookoła środka jego masy. Przyspieszenie liniowe sprawia, że gdy $a_1 m > T$ ładunek przemieszcza się względem skrzyni wagonu w kierunku uderzonej burty wagonu, co pokazano na rysunkach 3 i 4 oraz w artykułach [3 i 5].



Rys. 3. Najechanie. Ruch ładunku względem wagonu

Oznaczenia: $V_1 = V_w, V_2$ — bezwzględne prędkości pojazdów; V_m — bezwzględna prędkość ładunku; a_w — przyspieszenie wagonu; $V_{m/w}$ — prędkość ładunku względem wagonu; T — siła tarcia ładunku o podłogę wagonu. Na schemacie dodawania wektorów prędkości strzałki nad ich symbolami wskazują na zwrot wektora. Gdy $a_w > T/m$, wektor $V_{m/w}$ jest skierowany ku burcie tylnej



Rys. 4. Przemieszczenie materiału sypkiego względem wagonu podczas najechania

$V_{10} = 0, V_{20} > 0$. G_0 — środek masy wagonu z materiałem sypkim przed najechaniem; G — środek masy wagonu z materiałem sypkim podczas najechania; P, W, Q, H — siły działające na wagon; $\Delta x, \Delta z$ — składowe przemieszczenia środka masy wywołanego najechaniem; m_p — masa materiału sypkiego; $m_1(t) = m_w + m_p(t)$ — masa wagonu z piaskiem podczas najechania.

Gdy wagon osiąga określone przyspieszenie, część masy piasku zaczyna się przemieszczać względem wagonu w kierunku uderzonej (tylnej) burty; wtedy siła tarcia T między nieruchomą i ruchomą warstwą piasku staje się siłą wewnętrzną układu i ruchoma warstwa piasku nie wpływa na jego pęd.

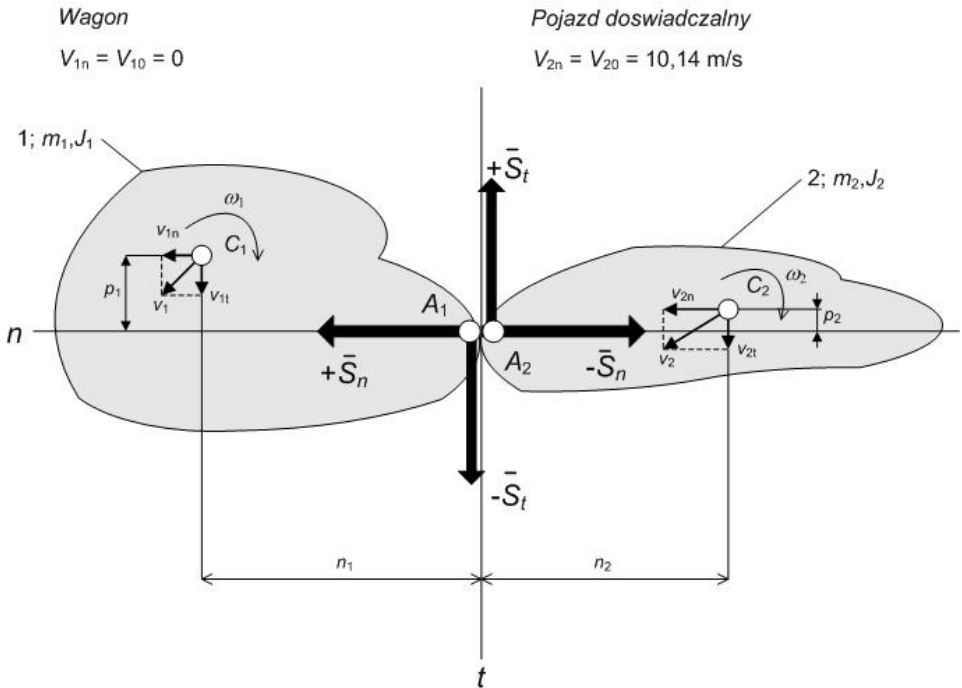
Środek masy wagonu z materiałem sypkim przemieszcza się podczas najechania o wielkość Δx ku tylnej burcie i o Δz w kierunku pionowym. Położenie środka masy G , kształt i wymiary sterty materiału spoczywającej na podłodze wagonu, jak i siły nacisku zestawów kołowych Q_A, Q_B są funkcjami czasu:

$$Q_A = \frac{W [-\Delta x(t)] + P(t)p}{2l}, \quad Q_B = \frac{W [+ \Delta x(t)] - P(t)p}{2l}$$

Pod koniec okresu najechania, gdy przyspieszenie wagonu oraz siła P maleją do zera, a składowa przemieszczenia Δx osiąga znaczną wartość, warunek Nadala dla zestawu A może nie być spełniony. Znaczenie symboli $e, p, l, \Delta x, \Delta z$ objaśnia rysunek 4.

4. ZDERZENIE MIMOŚRODKOWE DWÓCH CIAŁ O STAŁEJ MASIE — ANALIZA KINEMATYCZNA

Przedmiotem rozważań jest model zderzenia dwóch — o stałych masach — pojazdów szynowych, które są wyposażone w zderzaki o szorstkich powierzchniach styku. Normalna zderzenia, czyli linia prostopadła do powierzchni obu zderzaków w punkcie ich styku, nie przechodzi przez środki mas pojazdów, które na rysunku 5 oznaczono przez C_1, C_2 . Zachodzi więc zderzenie mimośrodkowe (rys. 5).



Rys. 5. Zderzenie mimosrodkowe ciał szorstkich o stałej masie
 $C_{1,2}$ — środki mas, $A_{1,2}$ — punkty styku

Zderzenie mimosrodkowe powoduje zmianę liniowych prędkości pojazdów oraz zmianę ich prędkości kątowych. Szorstkość powierzchni styku zderzaków sprawia, że podczas zderzenia — oprócz wektora siły normalnej \bar{P}_n — występuje siła styczna \bar{P}_t oraz ich impulsy \bar{S}_n i \bar{S}_t .

Na rysunku 5 pokazano wektory prędkości, wektory impulsów oraz niektóre inne wielkości omawiane w tym rozdziale.

Wektory prędkości normalnych są skierowane wzdłuż jednej linii prostej, można je więc zastąpić skalarami. Stan kinematyczny przed zderzeniem określają prędkości liniowe V_{in} , V_{it} i prędkości kątowe ω_i , gdzie $i = 1$ oznacza pojazd uderzony, a $i=2$ — pojazd uderzający.

Biejący czas z przedziału $(0, \tau)$ oznaczono symbolem t , długość zderzenia przez τ , zaś τ_I , τ_{II} oznaczają długość pierwszej (kompresja) i drugiej (restytucja) fazy zderzenia. Po zakończeniu zderzenia, gdy $t = \tau_I + \tau_{II}$, prędkości te oznaczono $V'_{in}, V'_{it}, \omega'_i$. Chwilowe prędkości oznaczono przez $\tilde{V}'_{in}, \tilde{V}'_{it}, \tilde{\omega}'_i$. W chwili $t = \tau_I$ lokalne odkształcenia ciał i siła ich wzajemnego oddziaływania są największe.

Punkty styku zderzaków A_1, A_2 przed zderzeniem miały bezwzględną prędkość U_1, U_2 , natomiast prędkość względna punktu A_2 względem punktu A_1 wynosiła $W = U_2 - U_1$, a po zderzeniu $W' = U'_2 - U'_1$. Składowa normalna prędkości względnej (prędkość ściskania) $W_n = U_{2n} - U_{1n}$ oraz $W'_n = U'_{2n} - U'_{1n}$.

Zależności wynikające z zasady zmienności pędu oraz krętu względem stałych środków mas C_i dostarczają sześciu równań:

$$m_i \left(\tilde{C}_{in} - V_{in} \right) \overset{\sim}{=} \left(\overset{\sim}{1} \right)^{i+1} \tilde{S}_n \quad (i = 1, 2) \quad (1), (2)$$

$$m_i \left(\tilde{C}_{it} - V_{it} \right) \overset{\sim}{=} \left(\overset{\sim}{1} \right)^i \tilde{S}_t \quad (3), (4)$$

$$J_i \left(\tilde{C}_i - \omega_i \right) \overset{\sim}{=} \left(\overset{\sim}{1} \right)^{i+1} \tilde{S}_n p_i + \tilde{S}_t n_i \quad (5), (6)$$

Skąd:
$$\tilde{V}_{in} = (-1)^{i+1} \cdot \frac{\tilde{S}_n}{m_i} + V_{in} \quad \tilde{V}_{it} = (-1)^i \cdot \frac{\tilde{S}_t}{m_i} + V_{it} \quad (1a) \text{—} (4a)$$

$$\tilde{\omega}_i = (-1)^{i+1} \cdot \frac{\tilde{S}_n p_i}{J_i} + \tilde{S}_t \frac{n_i}{J_i} + \omega_i \quad (5a), (6a)$$

Gdzie m_i oznacza masę ciała, p_i , n_i współrzędne środka masy C_i , biegunowy zaś moment bezwładności względem osi $C_i y$ prostopadłej do płaszczyzny rysunku oznaczono przez J_i .

Przez S_n oznaczono normalny impuls siły uderzenia. Impuls styczny, który powoduje zmianę pędu ciała w kierunku stycznym, oznaczono przez S_t .

Po zderzeniu, gdy $t = \tau$ wielkości chwilowe, $\tilde{V}, \tilde{\omega}, \tilde{S}$ występujące we wzorach (1)—(6) oraz (1a)—(6a) zastąpiono wartościami końcowymi V', ω', S' . Składowa normalna prędkości względnej punktów styku zderzaków przed zderzeniem:

$$W_n = U_{2n} - U_{1n} \quad \text{oraz po zderzeniu: } W'_n = U'_{2n} - U'_{1n}.$$

Na podstawie rysunku 5:

$$U_{in} = V_{in} + \omega_i p_i \quad \text{oraz} \quad U'_{in} = V'_{in} + \omega'_i p_i.$$

Zgodnie z hipotezą Newtona [2, 4] zachodzi związek:

$$W'_n = -k W_n \quad (7)$$

gdzie k jest współczynnikiem restytucji oraz $W_n = U_{2n} - U_{1n} = V_{2n} + \omega_2 p_2 - (V_{1n} + \omega_1 p_1)$

$$W'_n = \left(\tilde{C}'_{2n} + \omega'_2 p_2 \right) \overset{\sim}{=} \left(\tilde{C}'_{1n} + \omega'_1 p_1 \right) \overset{\sim}{=}$$

Po podstawieniu W_n i W'_n do wzoru (7):

$$\left(\tilde{C}'_{2n} + \omega'_2 p_2 \right) \overset{\sim}{=} \left(\tilde{C}'_{1n} + \omega'_1 p_1 \right) \overset{\sim}{=} -k \left[\left(\tilde{C}_{2n} + \omega_2 p_2 \right) \overset{\sim}{=} \left(\tilde{C}_{1n} + \omega_1 p_1 \right) \overset{\sim}{=} \right] \quad (7a)$$

Korzystając z zależności (1a), (2a) dla $t = \tau$:

$$V'_{2n} = \frac{-S'_n}{m_2} + V_{2n}; \quad V'_{1n} = \frac{S'_n}{m_1} + V_{1n} \quad (8)$$

$$\text{oraz (5), (6)} \quad \omega'_1 = \frac{S'_n p_1 + S'_t n_1}{J_1} + \omega_1; \quad \omega'_2 = \frac{-S'_n p_2 + S'_t n_2}{J_2} + \omega_2 \quad (9)$$

gdzie S'_n , S'_t oznaczają skalary impulsów w chwili $t = \tau$, J_i — biegunowe momenty bezwładności ciał dookoła ich środków mas C_i , natomiast p_i , n_i — współrzędne tych środków.

Po podstawieniu wzorów (8) i (9) do wzoru (7a):

$$-S'_n \left(\frac{1}{m_2} + \frac{p_2^2}{J_2} + \frac{1}{m_1} + \frac{p_1^2}{J_1} \right) - S'_t \left(\frac{n_1 p_1}{J_1} - \frac{n_2 p_2}{J_2} \right) + W_n = -k W_n$$

oznaczając

$$\alpha_{nn} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{p_1^2}{J_1} + \frac{p_2^2}{J_2}$$

$$\alpha_{np} = \frac{n_1 p_1}{J_1} - \frac{n_2 p_2}{J_2}$$

otrzyma się: $S'_n \alpha_{nn} - S'_t \alpha_{np} + W_n = -k W_n$

skąd $W_n(1+k) = S'_n \alpha_{nn} + S'_t \alpha_{np}$

Gdy \tilde{S}_t zależy liniowo od \tilde{S}_n , czyli $S'_t = \beta S'_n$, gdzie $\beta = \text{const}$

$$W_n(1+k) = S'_n (\alpha_{nn} + \beta \alpha_{np}), \text{ skąd}$$

$$S'_n = \frac{W_n(1+k)}{\alpha_{nn} + \beta \alpha_{np}}$$

Prędkości ciał po zderzeniu:

$$V'_{it} = V_{it} + \left(\frac{S'_t}{m_i} \right)$$

$$V'_{in} = V_{in} + \left(\frac{S'_n}{m_i} \right)$$

$$\omega'_i = \omega_i + \left(\frac{S'_n p_i}{J_i} + S'_t \frac{n_i}{J_i} \right)$$

Gdy $\beta = 0$, czyli gdy ciała nie oddziałują na siebie w kierunku stycznym (np. połączenie ma charakter dwóch przegubów ułożonych szeregowo), wówczas $S_t = S'_t = 0$; wtedy $V'_{it} = V_{it}$ oraz $V'_{1n} > V_{1n}$, $V'_{2n} < V_{2n}$, $\omega'_1 > \omega_1$, $\omega'_2 < \omega_2$.

Wspólna prędkość obu ciał V_c wystąpi gdy $t = \tau_1$

$$V_{1n}(t = \tau_1) = V_{2n}(t = \tau_1) = V_c$$

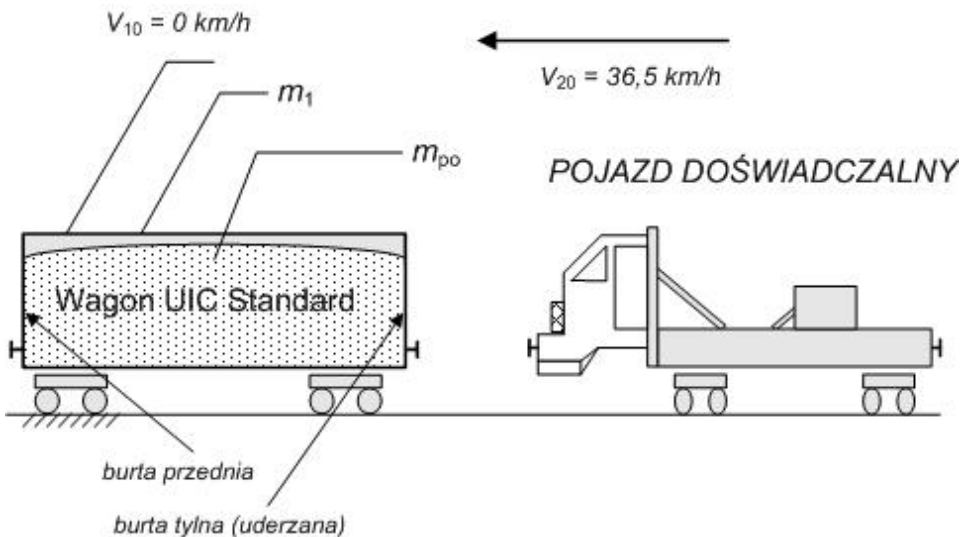
$$V_{1n} + \frac{S_n \langle \epsilon_1 \rangle}{m_1} = V_{2n} - \frac{S_n \langle \epsilon_1 \rangle}{m_2}$$

$$\text{skąd } S_n \langle \epsilon_1 \rangle = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \langle \epsilon_1 \rangle (V_{2n} - V_{1n})$$

$$\text{oraz } V_c = \frac{S_n \langle \epsilon_1 \rangle}{m_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \langle \epsilon_1 \rangle (V_{2n} - V_{1n})$$

5. OPIS EKSPERYMENTALNEGO ZDERZENIA WAGONU KOLEJOWEGO, ZAŁADOWANEGO PIASKIEM, Z POJAZDEM DOŚWIADCZALNYM

W rozwoju biernych środków bezpieczeństwa na kolejach europejskich ważną rolę odegrały wnioski z analiz wypadków kolejowych. W ich wyniku przyjęto kilka scenariuszy zderzeń. W ramach jednego z nich postanowiono, że zostanie zorganizowany eksperyment zderzeniowy na torze doświadczalnym CNTK w Żmigrodzie [5, 6]. Jego celem było sprawdzenie założeń, które przyjęto przy projektowaniu energochłonnej kabiny pojazdu doświadczalnego. Eksperyment miał dostarczyć informacji o przebiegu procesu zderzenia oraz o wartościach naprężeń i odkształceń ważnych elementów konstrukcyjnych kabiny. Eksperyment polegał na rejestrowanym zderzeniu (najechaniu) pojazdu doświadczalnego, wyposażonego wabinę o znanej charakterystyce zgniatania, ze stojącym wagonem załadowanym piaskiem. Wagon nie miał grodzi utrudniających ruch piasku względem burt wagonu. Obydwa pojazdy były pojazdami wózkowymi, czterosiowymi (rys. 6).



Rys. 6. Układ zderzających się mas; TEST 2 (przed zderzeniem)

Pojazd doświadczalny uderzający:

$$m_2 = 45 \text{ t};$$

współrzędne środka masy — $n_2 = 9,2 \text{ m}$, $p_2 = 0,27 \text{ m}$;

biegunowy moment bezwładności względem osi y , przechodzącej przez środek masy — $J_2 = 595 \text{ tm}^2$;

prędkości początkowe: $V_{20} = 10,14 \text{ m/s}$ oraz $\omega_{20} = 0$.

Wagon węglarka 415 W, pojazd uderzony:

$$m_w = 25 \text{ t}, m_{p0} = 55 \text{ t}, m_{10} = m_w + m_{p0} = 80 \text{ t}.$$

Gdy przyspieszenie wagonu jest bliskie zeru, wówczas $J_{10} = 718 \text{ tm}^2$, $p_{10} = 0,46 \text{ m}$, $n_{10} = 7,25 \text{ m}$.

Podczas zderzenia, na skutek wywołanego uderzeniem ruchu piasku względem nadwozia wagonu, zmieniała się „skuteczna” masa wagonu m_1 , współrzędne środka masy p_1 , n_1 oraz jego biegunowy moment bezwładności J_1 . Przez „skuteczną” masę pojazdu rozumie się tutaj tę część jego rzeczywistej masy, którą należy uwzględnić w równaniu wynikającym z zasady zachowania pędu. Prędkości początkowe $V_{10} = V_{1n} = 0$, oraz $\omega_{10} = 0$. Podczas zderzenia rejestrowano naprężenia i siły we wskazanych przez program badań elementach kabiny.

Rejestrowano także prędkości i przyspieszenia niedeformowalnych sekcji obu pojazdów. W tym celu wykorzystano fotokomórki oraz dwa radary umieszczone w osi zderzenia. Do rejestracji procesu deformacji kabiny pojazdu doświadczalnego wykorzystano profesjonalne kamery filmowe o dużej szybkości filmowania. Dwie z nich były umieszczone po prawej i lewej stronie toru, trzecia była zawieszona nad Obszarem zderzenia. Badania przewidziane programem zostały zakończone powodzeniem.

Film wykonany kamerą górną pokazał — między innymi — jak podczas zderzenia zmieniała się konfiguracja sterty piasku na wagonie, co umożliwiło wyznaczenie względnej prędkości powierzchniowej warstwy piasku. W przyszłości podobne, lecz lepiej oprzyrządowane badania pozwolą na bardziej szczegółową analizę rzeczywistego układu zderzających się ciał, który podczas zderzenia zmienia swoją masę „skuteczną”.

6. PORÓWNANIE NIEKTÓRYCH WYNIKÓW EKSPERYMENTU Z WYNIKAMI OBLICZEŃ ZDERZENIA DWÓCH POJAZDÓW O STAŁYCH MASACH

Porównano dwa układy zderzających się ciał: układ teoretyczny, złożony z ciał o stałych masach, porównano z układem, który był przedmiotem eksperymentu. Przyjęto, że w obu układach początkowe warunki (m_{p0} , V_{10}) oraz współczynniki restytucji były takie same. Wspólna prędkość obu ciał w układzie teoretycznym wynosiła

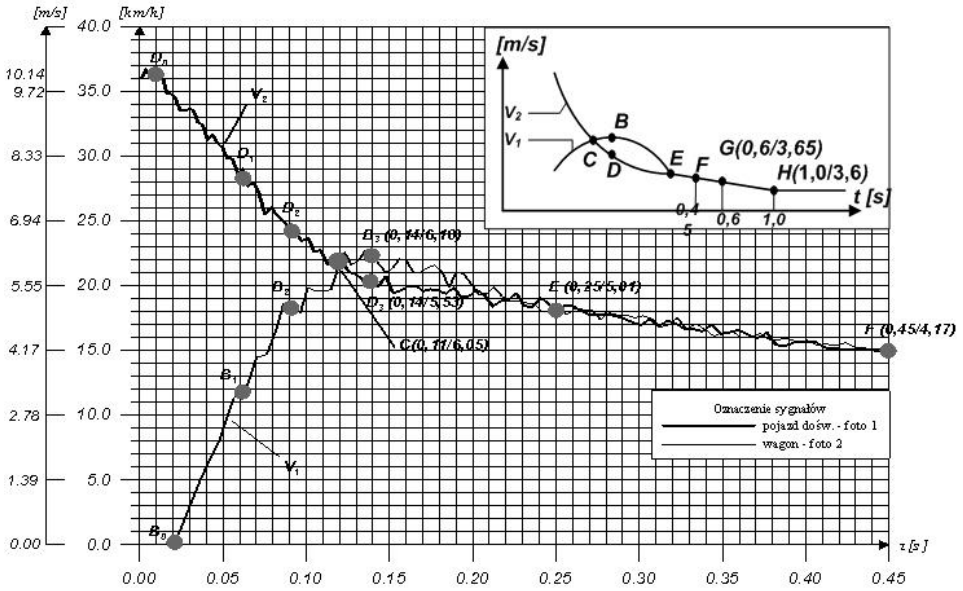
$$V_c^{\text{teor}} = V_{20} \frac{m_2}{m_1 + m_2} = 10,14 \frac{45}{125} = 3,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Na rysunku 7, przedstawiającym prędkości obu pojazdów, zarejestrowane podczas eksperymentalnego zderzenia, widać że:

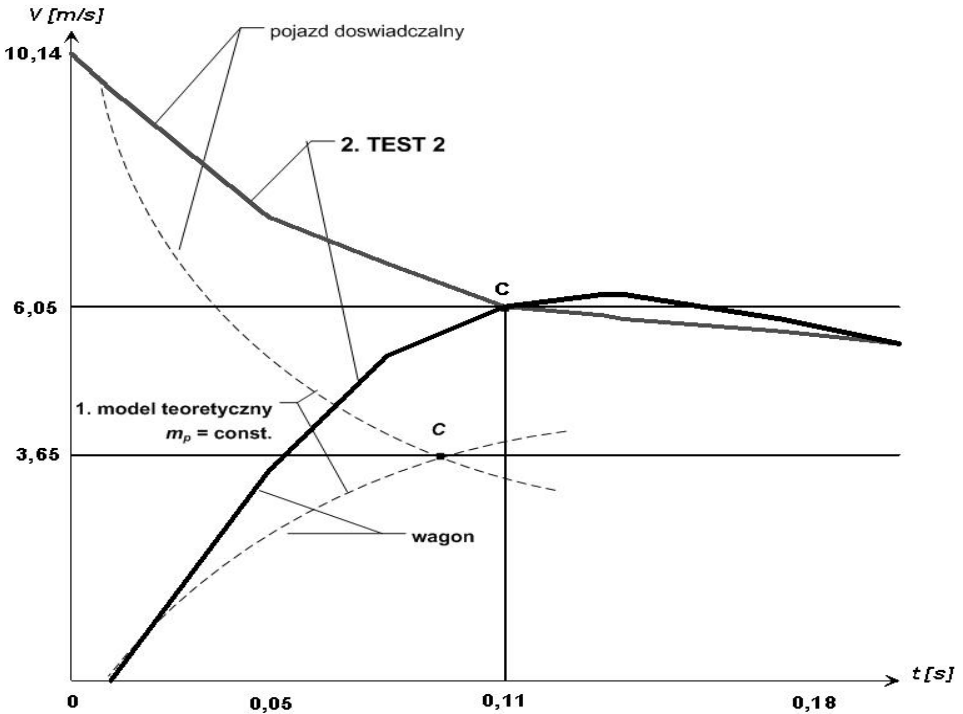
— wspólna prędkość obu pojazdów $V_c^{\text{exp}} = 6,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ znacznie przewyższa wspólną prędkość

ciół układu teoretycznego $V_c^{\text{teor}} = 3,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$;

Prędkość pojazdów



Rys. 7. Zapis prędkości pojazdu doświadczalnego V_2 i wagonu V_1 wykonany podczas zderżeń (TEST 2)



Rys. 8. Najechnięcie. Porównanie prędkości dwóch układów:

- — układ rzeczywisty (TEST 2) — wagon z ładunkiem piasku;
- - - - - model obliczeniowy — wagon o stałej masie

— zderzające się pojazdy dwa razy osiągnęły wspólną prędkość.

Po raz pierwszy wspólna prędkość pojazdów $V_{c1}^{\text{exp}} = 6,05 \frac{m}{s}$ wystąpiła po $t_1 = \tau_1 = 0,11$ s;

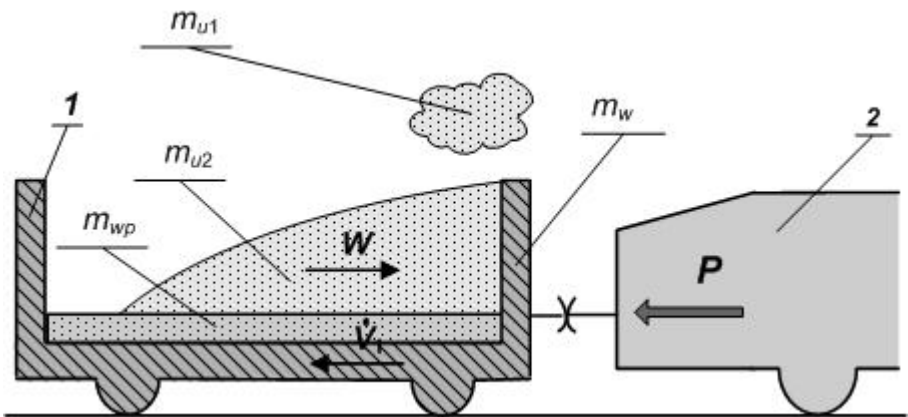
po raz drugi wspólna prędkość $V_c^{\text{exp}} = 5,01 \frac{m}{s}$ wystąpiła w chwili $t_2 = 0,25$ m/s .

W zakresie $t_1 \leq t \leq t_2$ prędkość pojazdu uderzonego przewyższała prędkość pojazdu uderzającego. Dla $t > 0,6$ s prędkości obu pojazdów były takie same i nowy układ złożony z dwóch pojazdów sztywno połączonych poruszał się dalej z prędkością $V_c \approx V_c^{\text{teor}} = 3,65 \frac{m}{s}$.

Opisane obserwacje doprowadziły do wniosku, że eksperymentalny układ rzeczywisty zachował się tak, jakby „skuteczna” masa wagonu z piaskiem zmieniała się podczas zderzenia. Na rysunku 8 przedstawiono w sposób poglądowy wpływ zmniejszania się masy wagonu z piaskiem na prędkości pojazdów podczas zderzenia.

7. PROPOZYCJE DALSZYCH PRAC PROWADZĄCYCH DO OCENY BEZPIECZEŃSTWA RUCHU POCIĄGU ZE WZGLĘDU NA WYKOLEJENIE

Ruch materiału sypkiego względem przewożącego go wagonu, wywołany zderzeniem, był już przedmiotem analizy jakościowej [3, 5]. W jej wyniku wyróżniono następujące składniki ładunku, pokazane na rysunku 9:



Rys. 9. Model ruchu piasku podczas najechania pojazdu 2 na pojazd 1

\dot{V}_1 — wektor przyspieszenia wagonu; W — wektor prędkości względnej piasku; m_{wp} — piasek, który nie wykonuje ruchu względnego; m_{u2} — piasek, który przesuwa się względem wagonu; m_{u1} — piasek, który unosi się nad wagonem

- 1) piasek o masie m_{wp} , który w chwili t pozostawał w bezruchu względem wagonu;
- 2) piasek o masie m_{u2} , który w chwili t przesuwał się w kierunku czołowej burty wagonu;

3) piasek o masie m_{i1} , który w chwili t unosił się nad wagonem¹.

Wartość masy każdego z tych składników, jak i udział poszczególnych składników w ich sumie zmienia się podczas zderzenia. Zmieniają się też biegunowy moment bezwładności J oraz współrzędne środka masy n , p wagonu. Każda z tych wielkości zależy od historii przyspieszenia wagonu w czasie od 0 do t .

Obliczenia przypadku zderzenia eksperymentalnego, uwzględniające zmienność masy wagonu z piaskiem, będą przedmiotem drugiej części niniejszego artykułu.

Obliczenia dotyczące ogólnego przypadku zderzenia układu o zmiennej masie będą możliwe po przeprowadzeniu kilku rejestrowanych zderzeń takiego samego wagonu z pojazdem o stałej masie, różniących się prędkością zderzenia. W efekcie może powstać metoda wyznaczania obliczeniowej, stałej masy wagonu z ładunkiem sypkim, której stosowanie umożliwi, mimo uproszczeń, ocenę rzeczywistej siły Q nacisku koła na szynę, a więc i ocenę stopnia narażenia wagonu na wykolejenie.

BIBLIOGRAFIA

1. Analysis of Locomotive Cabs. National Space Technology Laboratories. Engineering laboratory. Final Report 1982 Prepared for US Dept. of Transportation office of Research and Development. Washington D.C. 20590 — pgs. 1—38.
2. *Gryboś R.*: Teoria uderzenia w dyskretnych układach mechanicznych. Warszawa PWN, 1969.
3. *Johnson W., Mamalis A, G.*: Crashworthiness of vehicles Part II. University of Cambridge, England 1978.
4. *Leyko J.*: Dynamika punktów materialnych. Warszawa PWN, 1961.
5. *Pawlus J.*: Uproszczony model ruchu piasku przewożonego w wagonie podczas zderzenia — porównanie z wynikami eksperymentów. *Przegląd Mechaniczny* 2004, nr 5.
6. Safetrain. Train Crashworthiness for Europe. Sub-Task 8.2. Final Report 28.02.2001.
7. *Sobaś M.*: Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”. Stan i doskonalenie kryteriów bezpieczeństwa przed wykolejeniem pojazdów szynowych. *Pojazdy Szynowe* 2005, nr 4.

¹ Nieznaczna ilość piasku, która spadła na tor została pominięta w rozważaniach.