

Metoda obliczania stateczności poprzecznej towarowych wagonów samowyladowczych podczas rozładunku

W artykule przedstawiono metodę obliczania współczynnika stateczności poprzecznej podczas rozładunku towarowych wagonów samowyladowczych, kiedy rozładunek odbywa się przez przechylenie pudła. Podano założenia metody i wzory oraz przykład obliczania współczynnika. Omówiono wyniki obliczeń i podano ocenę metody oraz wnioski.

1. WSTĘP

Metoda dotyczy wagonów samowyladowczych, kiedy rozładunek odbywa się przez przechylenie pudła i równoczesne odchylenie burty, po której wysypuje się (zsuwa) ładunek.

Stateczność poprzeczną wagonu określa się jako zdolność konstrukcji do zachowania nie zmienionego położenia pod działaniem obciążenia podczas rozładunku, pochodzącego od przechylenia pudła i zsypu ładunku.

Określenie stateczności poprzecznej wagonów samowyladowczych podczas rozładunku ma istotne znaczenie dla zachowania bezpieczeństwa prac wyladowczych. Chodzi o upewnienie się i wykazanie, że podczas rozładunku nie nastąpi „wywrócenie się” wagonu.

Sprawdzenia stateczności poprzecznej dokonuje się wstępnie na etapie założeń projektu a ostatecznie po opracowaniu projektu technicznego wagonu i podczas badania prototypu wagonu; bierze się pod uwagę tylko wagon w stanie załadowanym.

Sprawdzenie stateczności wagonu podczas rozładunku przeprowadza się zarówno na prostym torze poziomym jak również na łuku, gdzie występuje przechyłka toru tj. odchylenie od wzajemnego wysokościowego położenia obu toków szynowych

Zgodnie z przepisami D1 [1] maksymalna wartość przechyłki toru wynosi 150mm, przy czym w zależności od dopuszczalnej maksymalnej prędkości jazdy dla danej linii, odchyłka przechyłki może wynosić:

- dla $V > 80 \text{ km/h}$ +/- 5 mm
- dla $V \leq 80 \text{ km/h}$ +/- 10 mm

Stateczność poprzeczną określa się liczbowo jako tzw. współczynnik stateczności poprzecznej K_{sp} , czyli współczynnik bezpieczeństwa podczas rozładunku. Współczynnik ten powinien wynosić $K_{sp} \geq 1,5$.

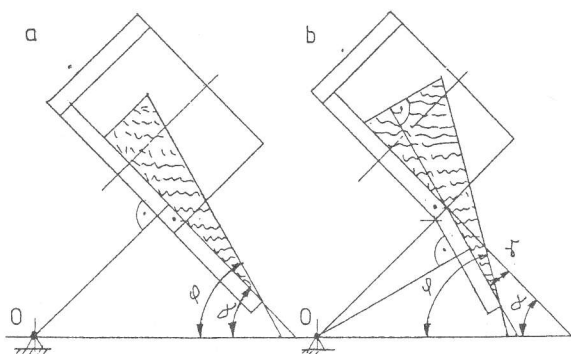
Przedstawiona metoda obliczania współczynnika stateczności poprzecznej K_{sp} oparta jest na normach obliczeń wagonów opracowanych przez kolej radziecką w 1987r. [2].

2. ZAŁOŻENIA METODY

Do obliczania stateczności wagonu podczas rozładunku przyjęto następujące założenia:

1. Rozładunek odbywa się w skrajnie niekorzystnych warunkach tj.
 - a) wagon stoi na łuku toru o maksymalnej przechyłce,
 - b) siła wiatru działa w kierunku zsypywanego ładunku po przechyleniu pudła o maksymalny kąt α .

2. Punkt obrotu wagonu „0” (umowny), względem którego oblicza się działanie momentów od sił masy własnej zespołów wagonu i masy zsuwającego się ładunku, (teoretyczna oś równowagi) znajduje się w płaszczyźnie główek szyn, w odległości od osi toru równej połowie szerokości toru (dla toru normalnego tj. $1435 : 2 = 717,5 \text{ mm}$) a główki szyn toru znajdują się w poziomie (na jednakowej wysokości dla toru prostego).
3. Pudło wagonu znajduje się w maksymalnym, teoretycznie możliwym, przechyleniu tj. przy uwzględnieniu: ugięcia usprężynowania i wyczerpania luzu na ślizgach bocznych z jednej strony wagonu (tej samej), niesymetrii pudła i wózków, odchyłek wykonawczych, niesymetrii usprężynowania i niesymetrii rozmieszczenia ładunku.
4. Nie uwzględnia się odkształceń toru.
5. Rozpatrywany jest przypadek rozładunku, gdy ładunek zsuwa się zwartą masą (pryzmą) i maksymalną siłą tarcia o podłogę i burtę wagonu, przy czym tylna płaszczyzna pryzmy jest prostopadła do podłogi lub burty, kąt pryzmy względem płaszczyzny poziomej φ zmienia się w granicach $50 \div 75^\circ$ a współczynnik tarcia ładunku o pudło wynosi $f = 0,65$. W zależności od konstrukcji wagonu mogą wystąpić 2 warianty (rys.1):
 - a) zsypl, kiedy burta stanowi przedłużenie podłogi tzn. kąt α pochylenia burty i podłogi jest taki sam (rys.1a), tzw. zsypl jednostronny,
 - b) zsypl, kiedy burta odchyła się od podłogi o dodatkowy kąt γ (rys.1b), tzw. zsypl dwustronny.



Rys. 1. Możliwe położenia burty podczas zsyplu

- a) podłoga i burta tworzą jedną płaszczyznę zsyplu (zsypl jednostronny)
- b) burta odchyła się dodatkowo od płaszczyzny zsyplu podłogi o kąt γ (zsypl dwustronny)

6. Nie uwzględnia się prędkości przechylania pudła i opadania burty (tzw. stuknięcie podczas opadania burty); przechylanie pudła powinno być łagodne, zwłaszcza w ostatniej fazie, aby nie wywoływać dodatkowego momentu „wywracającego” wagon.

M.in. z tego względu $K_{sp} \geq 1,5$.

7. Charakterystykę niektórych najczęściej przewożonych sypkich ładunków podano wg [2] w tabeli 1.

Charakterystyka sypkich ładunków

Tabela 1

L.p.	Rodzaj ładunku	Gęstość usypowa t/m^3	Kąt naturalnego zsypania		Kąt tarcia	
			rad	°	rad	°
1.	piasek suchy	1,65	0,44	25,2	0,52	29,8
2.	piasek wilgotny	1,95	0,70	40,1	0,31	17,8
3.	glina sucha	1,50	0,79	45,3	0,60	34,4
4.	glina brylowata	2,0	0,61	35,0	0,52	29,8
5.	żwir kamienny i granitowy	1,6	0,79	45,3	0,52	29,8
6.	ruda żelazna, manganowa	2,0	0,61	35,0	0,52	29,8
7.	ruda miedziana, niklowa	1,3	0,81	50,0	0,60	34,4
8.	krusze skalne granitowe	2,6	0,61	35,0	0,52	29,8
9.	piaskowiec w kawałkach	2,4	0,61	35,0	0,52	29,8

Z tabeli 1 wynika, że kąt naturalnego zsypania dla przewożonych ładunków (poza jednym przypadkiem) nie przekracza $45,3^\circ$ i tym samym kąt przechylenia pudła powinien wynosić $\alpha \geq 45^\circ$, co ma miejsce w większości wagonów samowyładowczych.

3. OBLICZANIE WSPÓŁCZYNNIKA STATECZNOŚCI POPRZECZNEJ

Współczynnik stateczności poprzecznej K_{sp} oblicza się wg wzoru [2]:

$$K_{sp} = \frac{\Sigma M_Q}{\Sigma M_w + \Sigma M_L} \geq 1,5 \quad (1)$$

gdzie:

ΣM_Q – suma momentów od sił ciężkości elementów wagonu,

ΣM_w – suma momentów od sił parcia wiatru, przy parciu jednostkowym $500 N/m^2$,

ΣM_L – suma momentów od zsuwającej się przysmy ładunku.

3.1. MASY WŁASNE ZESPOŁÓW WAGONU I POŁOŻENIE ICH ŚRODKÓW CIĘŻKOŚCI

Wagon należy podzielić na co najmniej następujące zespoły (rys.2):

- Q_w – masa własna wózka
- Q_o – masa własna ostoj z instalacją rozładowniczą (siłowniki do przechylania pudła), układem hamulcowym, urządzeniami pociągowo-zderznymi, urządzeniami zewnętrznymi itp.
- Q_p – masa własna pudła, przy czym z uwagi na jego przechylanie:

$$Q_p = 2Q_{cz} + 2Q_b + 2Q_{op} + Q_r + 2Q_m$$

gdzie:

Q_{cz} – ściana czołowa,

Q_b – burta,

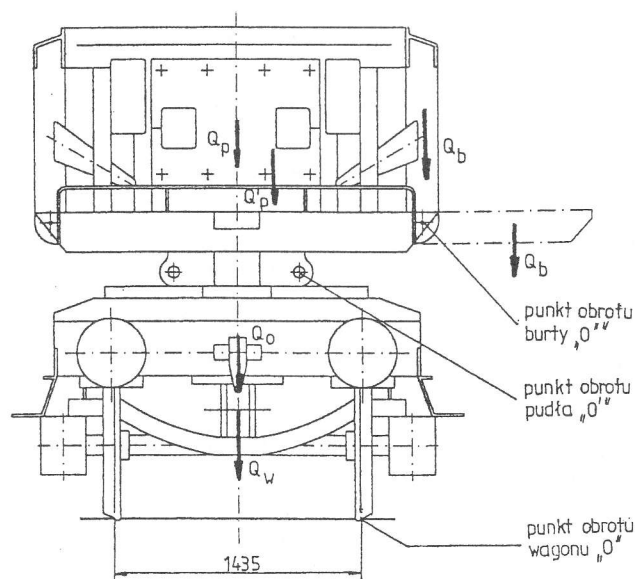
Q_{op} – ostojnica pudła,

Q_r – rama pudła,

Q_m – mechanizm otwierania burty.

Musi być spełniony warunek, aby masa własna pojazdu Q wynosiła

$$Q = 2Q_w + Q_o + Q_p$$



Rys. 2. Układ zespołów wagonu

Po ustaleniu wartości poszczególnych mas należy obliczyć położenie ich środków ciężkości na podstawie dokumentacji (orientacyjnie może być tylko na etapie założeń). Im bardziej precyzyjnie określi się położenie środków ciężkości, tym bliższy rzeczywistości będzie współczynnik stateczności poprzecznej. Położenie środków ciężkości powinno być określone w układzie współrzędnym, przechodzącym przez punkt obrotu wagonu „0”.

Kolejnym krokiem jest obliczenie położenia środka ciężkości pudła Q_p po jego przechyleniu o kąt α z uwzględnieniem, że jedna burta jest otwarta. W trakcie przechylania pudła i równoczesnego otwierania burty środek ciężkości pudła zmienia po odpowiedniej trajektorii swoje położenie zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej.

Dalszym krokiem jest obliczenie położenia środków ciężkości poszczególnych mas na łuku.

Do obliczeń stateczności podczas rozładunku na łuku należy przyjąć maksymalną możliwą przechyłkę toru tj. 150+10 mm (odchyłka) o wartości 160 mm.

Ta przechyłka powoduje obrót całego wagonu o kąt β' równy

$$\beta' = \arctg \frac{160}{1500} = \arctg 0,106666 = 06^{\circ}05'20''$$

Dodatkowo należy uwzględnić kąt $\beta'' = 0,7565^{\circ}$ ($45'$), spowodowany niesymetrią usprężynowania, mimośrodowością ładunku i odchyłkami wykonawczymi [3].

Tak więc obrót wagonu może nastąpić o maksymalny kąt

$$\beta = \beta' + \beta'' = 06^{\circ}50'20''$$

Zmieni się położenie środków ciężkości poszczególnych zespołów wagonu.

3.2. OBLICZANIE MOMENTÓW OD SIŁ CIĘŻKOŚCI

Momenty od sił ciężkości zespołów wagonu oblicza się dla przypadku, kiedy pudło wagonu jest przechylone o maksymalny kąt α i jedna burta jest otwarta.

Dotyczy to rozładunku zarówno na prostym torze poziomym jak również na łuku.

Suma momentów wzgl. pkt. „0” wynosi:

$$\Sigma M_Q = \Sigma Q_i \cdot l_i \quad (2)$$

gdzie:

Q_i – masa własna danego zespołu,

l_i – odległość środka ciężkości tego zespołu od rzędnej punktu „0”.

3.3. OBLICZANIE MOMENTU OD SIŁY PARCIA WIATRU

Moment względem pkt. „0” od siły parcia wiatru, kiedy pudło jest przechylone, jest następujący:

$$\Sigma M_W = P_w \cdot h_w \quad (3)$$

gdzie:

P_w – siła parcia wiatru

$$P_w = P_j \cdot A \quad (4)$$

Przy czym:

$P_j = 500 \text{ N/m}^2$ jednostkowe obliczeniowe parcie wiatru,

$A = L \cdot h_p [\text{m}^2]$ powierzchnia boczna pudła po przechyleniu (rzut na oś rzędnych),

L – długość zewnętrzna pudła,

h_p – wysokość pudła po przechyleniu (rzut),

h_w – wysokość środka ciężkości parcia wiatru od główki szyny.

Wzór (3) stanowi uproszczone obliczenie momentu od siły parcia wiatru; tak obliczony moment jest nieco zawyżony w stosunku do występującego w rzeczywistości, ale działa na korzyść bezpieczeństwa podczas rozładunku.

Do obliczeń można przyjąć, że moment od siły parcia wiatru jest taki sam zarówno na poziomym torze prostym jak i na łuku.

3.4. OBLICZANIE MOMENTÓW OD ZSUWAJĄCEJ SIĘ PRYZMY ŁADUNKU

Suma momentów względem pkt. „0” wynosi:

$$\Sigma M_L = -N \cdot a + F_L \cdot b + F_b \cdot c \quad (5)$$

gdzie:

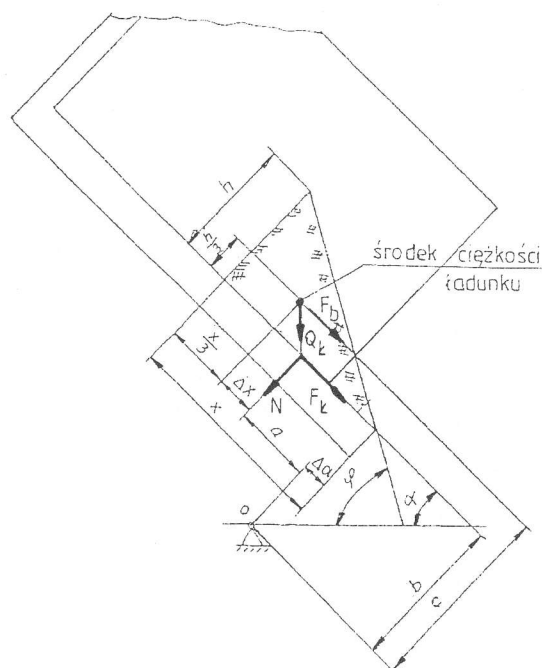
N – siła nacisku (składowa) ładunku na podłogę i burtę wagonu, równomiernie rozłożona,

F_L – siła tarcia ładunku o podłogę i burtę, równomiernie rozłożona,

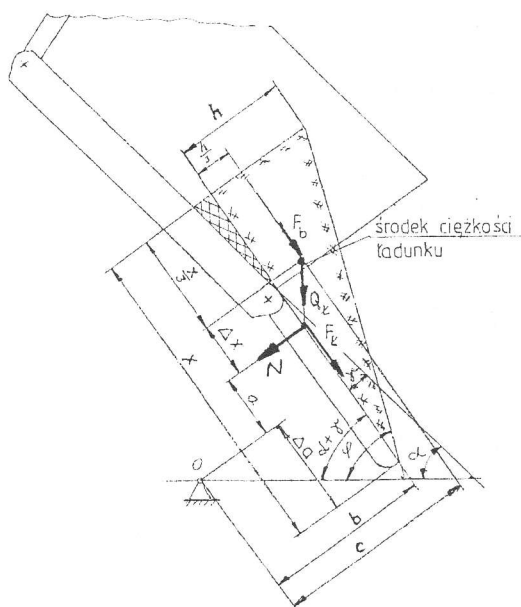
F_b – siła tarcia o ściany czołowe,

a, b, c – wymiary względem punktu obrotu wagonu określające ramię siły.

Obciążenie pudła wagonu od ładunku pokazano schematycznie na rys.3 dla zsypu jednostronnego i na rys.4 dla zsypu dwustronnego.



Rys. 3. Schemat obciążenia pudła wagonu od ładunku dla zsypu jednostronnego



Rys. 4. Schemat obciążenia pudła wagonu od ładunku dla zsypu dwustronnego

Przypadek I

Dla poziomego toru prostego zależności są następujące:

Siłę N oblicza się ze wzoru:

$$N = \frac{1}{2} \cdot x \cdot h \cdot l_p \cdot \delta \cdot \cos(\alpha + \gamma) \quad (6)$$

gdzie:

x i h - wymiary poprzeczne ładunku (przekrój pryzmy przyjmuje się jako trójkąt),

l_p - wewnętrzna długość pudła,

δ - ciężar usypowy ładunku (wg tablicy 1),

α - kąt pochylenia podłogi pudła względem poziomu po przechyleniu,

γ - dodatkowy kąt odchylenia burty od podłogi; dla zsypu jednostronnego $\gamma = 0$.

Siłę tarcia F_L oblicza się ze wzoru:

$$F_L = N \cdot f \quad (7)$$

gdzie:

$f = 0,65$ - współczynnik tarcia ładunku o podłogę i burtę.

Siłę tarcia F_b o ściany czołowe przyjmuje się w wysokości 10 % siły F_L , czyli

$$F_b = 0,1 F_L \quad (8)$$

Dla uproszczenia obliczeń pomija się dla zsypu dwustronnego część ładunku, o przekroju zakreskowanym na rys.4; pominięcie to działa na korzyść bezpieczeństwa podczas rozładunku.

Minimalna wartość współczynnika stateczności poprzecznej wg wzoru (1) występuje wtedy, kiedy suma momentów od zsuwającej się pryzmy ładunku ΣM_L wg wzoru (5) jest maksymalna. Pozostałe człony wzoru (1) nie zależą od ładunku.

Zakłada się, że funkcja wg wzoru (5) jest ciągła i dla takiej funkcji maksimum zachodzi jedynie w punktach, w których pochodna jest równa zero. Jest to warunek konieczny dla maksimum funkcji.

Z tego względu funkcję wg wyrażenia (5) należy zróżniczkować względem szerokości pryzmy x i po przyrównaniu pochodnej do zera określić x .

Zatem

$$\frac{dM_L}{dx} = x^2(-2 + A + 0,1 \cdot f \cdot B) + x(2\Delta a + 2,2 \cdot f \cdot b) = 0$$

Z tego równania oblicza się x :

$$x = \frac{2(\Delta a + 1,1 \cdot f \cdot b)}{2 - A - 0,1 \cdot f \cdot B} \quad (9)$$

gdzie:

$$A = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \gamma) \quad (10)$$

$$B = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma) \quad (11)$$

Δa i b - wymiary wynikające z konstrukcji wagonu.

Pozostałe wymiary pryzmy i położenia ładunku są następujące:

$$h = x \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma) \quad (12)$$

$$a = \frac{2}{3}x - \Delta x - \Delta a \quad (13)$$

$$c = b + \frac{h}{3} \quad (14)$$

$$\Delta x = \frac{h}{3} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \gamma) = \frac{1}{3} \cdot x \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \gamma) \quad (15)$$

Dla zsypu jednostronnego $\gamma = 0$.

Po obliczeniu momentów wg punktów: 3.2., 3.3. i 3.4. dla danego kąta γ , oblicza się współczynnik stateczności poprzecznej K_{sp} wg wzoru (1).

Przypadek II

Dla łuku zależności są następujące:

Przy obliczaniu stateczności należy dodatkowo uwzględnić kąt β , wynikający z przechyłki toru (pkt.3.1.).

Siłę N oblicza się ze wzoru:

$$N = \frac{1}{2} \cdot x \cdot h \cdot l_p \cdot \delta \cdot \cos(\alpha + \gamma + \beta) \quad (16)$$

Wartość x oblicza się wg wzoru (9) z tym, że:

$$A = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma - \beta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \gamma + \beta) \quad (17)$$

$$B = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma - \beta) \quad (18)$$

Pozostałe wymiary pryzmy i położenia ładunku są następujące:

$$h = x \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma - \beta) \quad (19)$$

$$\Delta x = \frac{h}{3} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \gamma + \beta) = \frac{1}{3} \cdot x \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha - \gamma - \beta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \gamma + \beta) \quad (20)$$

Ponadto należy obliczyć „a” wg wzoru (13) i „c” wg (14).

4. PRZYKŁAD OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKA STATECZNOŚCI PODCZAS ROZŁADUNKU WAGONU

Jako przykład zastosowania metody obliczono współczynnik stateczności poprzecznej podczas rozładunku wagonu dla jednego z czteroosiowych wagonów samowyładowczych o następujących parametrach, istotnych dla obliczenia współczynnika:

- masy własne zespołów i wagonu oraz położenie ich środków ciężkości od punktu obrotu w płaszczyźnie pionowej (y):
 - masa własna wagonu Q wynosi 27 500 daN¹⁾,
 - masa własna wózka Q_w typu 26TNa wynosi 4460 daN i położenie jej środka ciężkości $y_w = 55$ cm,
 - masa własna ostoi Q_o z instalacją rozładawczą (siłowniki do przechylania pudła), układem hamulcowym, urządzeniami pociągowo-zderznymi, urządzeniami zewnętrznymi itp. wynosi 9844 daN i położenie jej środka ciężkości $y_o = 120$ cm,
 - masa własna pudła Q_p z mechanizmami otwierania burt wynosi 8736 daN i położenie jej środka ciężkości od punktu obrotu pudła $y_p = 53,4$ cm; masa pudła z 1

burtą wynosi $Q'_p = 7506$ daN i położenie jej środka ciężkości od punktu obrotu pudła wynosi $y'_p = 46,0$ cm,

- masa własna burty Q_b wynosi 1230 daN i położenie jej środka ciężkości od punktu obrotu burty $y_b = 69,7$ cm,
- masa własna ściany czołowej $Q_{cz} = 338,2$ daN,
- masa własna ostojnicy pudła $Q_{op} = 456,8$ daN,
- masa własna ramy pudła $Q_r = 3974$ daN,
- masa własna mechanizmu otwierania burty $Q_m = 356$ daN.

- Wymiary wewnątrz pudła:
 - długość 9870 mm,
 - szerokość 2670 mm,
 - wysokość 1190 mm,

- Wymiary zewnętrzne pudła i ostoi:
 - długość 10700 mm,
 - wysokość 3950 mm,

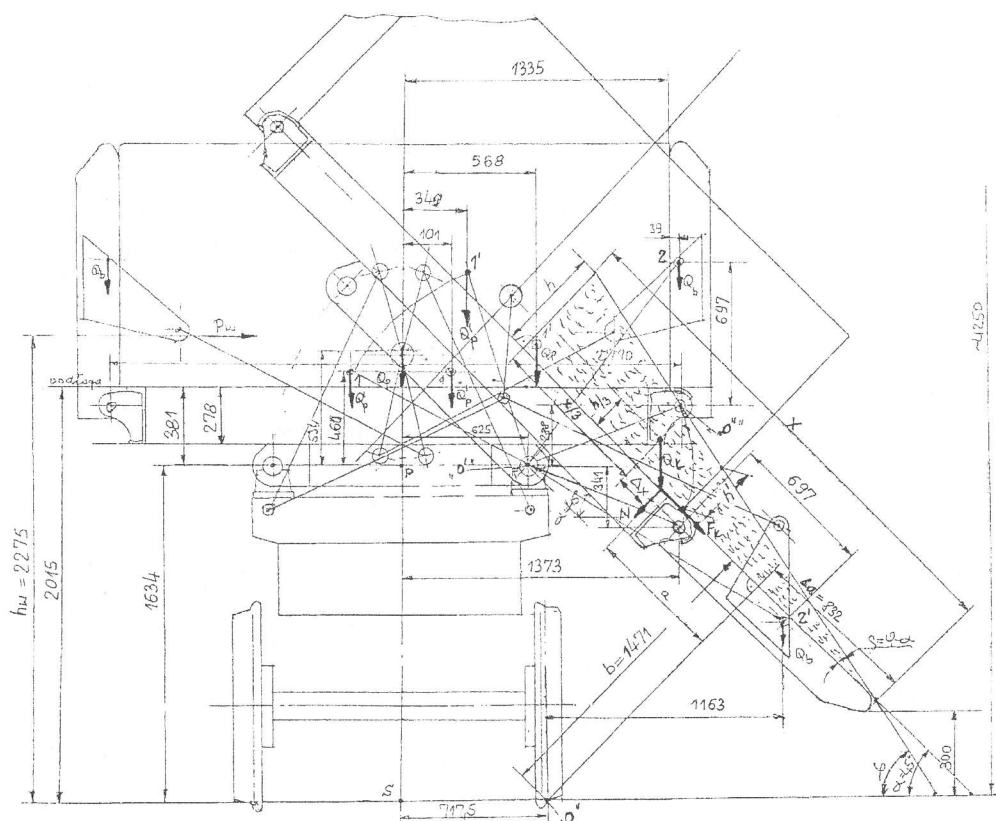
- Wysokość środka ciężkości parcia wiatru od główki szyny wynosi 2275 mm,

- kąt przechylenia pudła $\alpha = 45^\circ$ (między poziomem a podłogą i burtą podczas zsypu),

- zsymp jednostronny (kąt $\gamma = 0$).

4.1. OBLICZENIE STATECZNOŚCI WAGONU PODCZAS ROZŁADUNKU NA PROSTYM TORZE POZIOMYM

Położenie wagonu na torze prostym i pudła po przechyleniu o kąt $\alpha = 45^\circ$ pokazano schematycznie na rys.5.



Rys. 5. Przechylenie pudła podczas rozładunku na torze poziomym

¹⁾ zamiast kg, co nie wpływa na wyniki obliczeń (K_{sp}).

1. Momenty od sił ciężkości elementów wagonu oblicza się dla przypadku, kiedy pudło wagonu jest przechylone o maksymalny kąt α i jedna burta jest otwarta. Jest to podstawowy wariant w eksploatacji wagonu. Suma momentów względem pkt. "0" wg wzoru (2) wynosi:

$$\begin{aligned}\Sigma M_Q &= Q'_p (71,75 - 34,9) + (Q_o + 2Q_w) \cdot \\ &\cdot 71,75 - Q_b \cdot 116,3 = 7506 \cdot 36,85 + (9844 + 8920) \cdot \\ &\cdot 71,75 - 1230 \cdot 116,3 = 1,4859 \cdot 10^6 \text{ daNcm}\end{aligned}$$

$$\Sigma M_Q = 1,4859 \cdot 10^6 \text{ daNcm}$$

2. Moment względem pkt. „0” od siły parcia wiatru wynosi wg wzoru (3) i (4):

$$\Sigma M_w = P_j \cdot A \cdot h_w = 50 \cdot 10,7 \cdot 3,95 \cdot 227,5$$

$$\Sigma M_w = 0,4816 \cdot 10^6 \text{ daNcm}$$

3. Suma momentów względem pkt. "0" od zsuwającej się przemy ładunku wynosi wg wzorów od (5) do (15) dla przypadku I (tor prosty):

$$\Sigma M_L = -N \cdot a + F_L \cdot b + F_b \cdot c$$

i zależy od przyjętego kąta φ .

W tabeli 2 podano wyniki obliczeń współczynnika stateczności poprzecznej K_{sp} podczas rozładunku dla różnych wartości kąta φ .

Dodatkowo obliczono i podano w tabeli 2 współczynnik stateczności poprzecznej K'_{sp} przy bezwietrznej pogodzie,

$$\text{kiedy } \Sigma M_w = 0 \text{ i wtedy } K'_{sp} = \frac{\Sigma M_Q}{\Sigma M_L}.$$

Współczynniki stateczności poprzecznej K_{sp} i K'_{sp}
dla różnych kątów φ przy rozładunku na torze poziomym

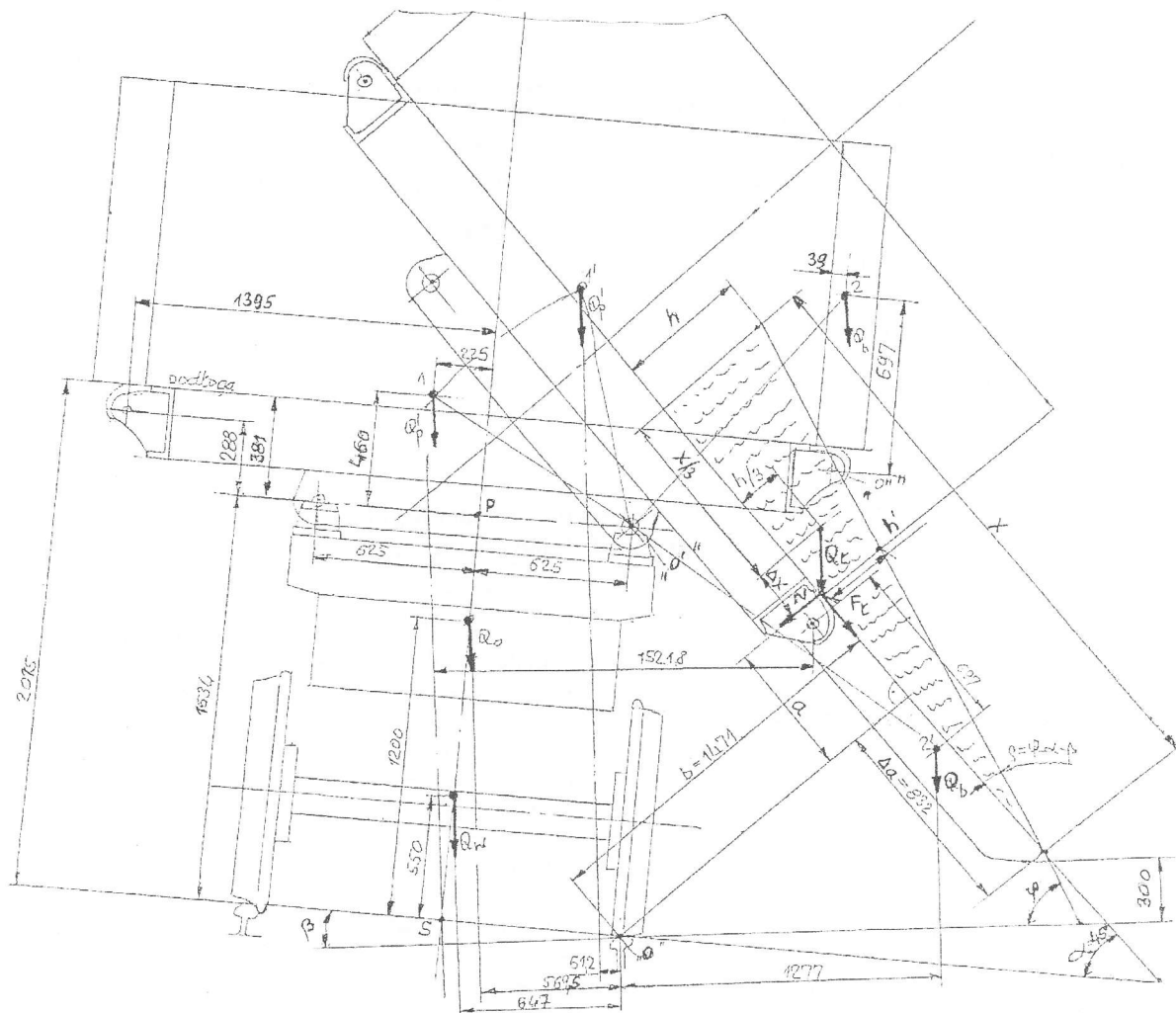
Tabela 2

Lp	φ [°]	X [cm]	h [cm]	Δ_x [cm]	a [cm]	c [cm]	N [daN]	F_L [daN]	F_b [daN]	ΣM_L [daNcm]	K_{sp}	K'_{sp} 1)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	75	272,0	157,0	52,3	45,8	199,4	29 058	18 888	1889	$1,824 \times 10^6$	0,64	0,81
2.	70	250,6	116,8	39,0	44,9	186,1	19 917	12 946	1295	$1,250 \times 10^6$	0,86	1,19
3.	66	236,8	90,9	30,3	44,4	177,4	14 647	9 520	952	$0,919 \times 10^6$	1,06	1,52
4.	65	233,7	85,0	28,3	44,3	175,4	13 517	8 786	879	$0,8478 \times 10^6$	1,12	1,75
5.	60	219,7	58,9	19,6	43,7	166,7	8 805	5 724	572	$0,5526 \times 10^6$	1,44	2,69
6.	59	217,2	54,2	18,0	43,6	165,1	8 011	5 207	521	$0,5027 \times 10^6$	1,51	2,96
7.	58	214,8	49,6	16,5	43,5	163,6	7 250	4 712	471	$0,4548 \times 10^6$	1,59	3,27
8.	57	212,4	45,2	15,0	43,4	162,1	6 533	4 246	425	$0,4099 \times 10^6$	1,67	3,62
9.	56	210,0	40,8	13,6	43,2	160,7	5 830	3 790	379	$0,3666 \times 10^6$	1,75	4,05
10.	55	207,9	36,7	12,2	43,2	159,3	5 185	3 370	337	$0,3254 \times 10^6$	1,84	4,56

¹⁾ K'_{sp} przy bezwietrznej pogodzie ($\Sigma M_w = 0$)

4.2. OBLICZENIE STATECZNOŚCI WAGONU PODCZAS ROZŁADUNKU NA ŁUKU

Położenie wagonu na łuku i pudła po przechyleniu o kąt $\alpha = 45^\circ$ pokazano schematycznie na rys.6.



Rys. 6. Przechylenie pudła podczas rozładunku na łuku

1. Momenty od sił ciężkości elementów wagonu oblicza się analogicznie jak w pkt.4.1.1. z tym, że położenie środków ciężkości zespołów jest inne, wynikające z ich przemieszczenia o kąt β .

Suma momentów względem pkt. "0":

$$\begin{aligned}\Sigma M_Q &= Q'_p \cdot 6,12 + Q_0 \cdot 56,95 + 2Q_w \cdot 64,7 - \\ &- Q_b \cdot 127,7 = 7506 \cdot 6,12 + 9844 \cdot 56,95 + 8920 \cdot \\ &\cdot 64,7 - 1230 \cdot 127,7 = 1,0266 \cdot 10^6 \\ \Sigma M_Q &= 1,0266 \cdot 10^6 \text{ daNcm}\end{aligned}$$

2. Moment od siły parcia wiatru wynosi wg pkt.4.1.2.

$$\Sigma M_w = 0,4816 \text{ daNcm}$$

3. Sumę momentów względem pkt."0" pod zsuwającą się pryzmą ładunku obliczono dla przypadku II (łuk) wg wzorów (5) i (16) do (20) i zależy ona od przyjętego kąta φ i kąta przechyłki β .

W tabeli 3 podano wyniki obliczeń współczynnika stateczności poprzecznej K_{sp} podczas rozładunku dla różnych wartości kąta φ od 70° do 58° .

Dla $\varphi > 70^\circ$ współczynnik $K_{sp} < 1,5$ (maleje) a dla $\varphi < 58^\circ$ współczynnik $K_{sp} > 1,5$ (rośnie).

Dodatkowo obliczono i podano w tabeli 3 współczynnik K'_{sp} przy bezwietrznej pogodzie ($\Sigma M_w = 0$).

**Współczynniki stateczności poprzecznej K_{sp} i K'_{sp}
dla różnych kątów φ przy rozładunku na łuku**

Tabela 3

L_p	φ [°]	X [cm]	h [cm]	Δ_x [cm]	a [cm]	c [cm]	N [daN]	F_L [daN]	F_b [daN]	ΣM_L [daNcm]	K_{sp}	K'_{sp} 1)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	70	241,3	79,2	33,6	44,0	173,5	11363	7386	739	$0,7147 \times 10^6$	0,86	1,43
2.	69	237,4	73,3	31,1	44,0	171,5	10347	6725	673	$0,6494 \times 10^6$	0,91	1,58
3.	68	233,7	67,7	28,7	43,9	169,7	9407	6115	612	$0,5904 \times 10^6$	0,96	1,74
4.	66	226,6	57,2	24,25	43,6	166,2	7704	5008	501	$0,48405 \times 10^6$	1,063	2,12
5.	65	223,3	52,2	22,15	43,5	164,5	6931	4505	451	$0,4354 \times 10^6$	1,19	2,36
6.	62	214,0	38,4	16,3	43,2	160,0	4881	3173	317	$0,3066 \times 10^6$	1,30	3,35
7.	60	208,4	29,9	12,7	43,0	157,1	3705	2408	241	$0,2328 \times 10^6$	1,47	4,41
8.	59	205,6	25,8	11,0	42,9	156,7	3154	2050	205	$0,1984 \times 10^6$	1,51	5,17
9.	58	203,0	21,9	9,3	42,8	154,4	2643	1718	172	$0,1662 \times 10^6$	1,58	6,17

¹⁾ K'_{sp} przy bezwietrznej pogodzie ($\Sigma M_w = 0$)

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Na stateczność poprzeczną wagonu samowyładowczego podczas rozładunku mają istotny wpływ następujące czynniki:

- zsuwająca się masa ładunku (pryzma),
- działanie siły parcia wiatru,
- przechyłka toru,
- konstrukcja wagonu.

Uzyskanie zalecanego współczynnika $K_{sp} \geq 1,5$ nie jest możliwe dla zalecanego kąta $\varphi = 75^\circ$ (tabela 2) dla zsyłu jednostronnego. Dla kąta $\varphi = 75^\circ$ współczynnik stateczności $K_{sp} = 0,64$, a więc jest 2,3 razy mniejszy od zalecanego, a przy bezwietrznej pogodzie $K'_{sp} = 0,81$ (1,85 razy mniejszy).

Wydaje się, że zalecana metoda obliczeń [2] stawia zbyt wygórowane wymagania, jeżeli chodzi o kąt φ , jaki tworzy powierzchnia zsyłującego się ładunku z poziomem.

Przyjmując kąt $\varphi = 75^\circ$, kąt zsyłu ładunku po podłodze i burcie wynosi $\varphi - \alpha = 30^\circ$ i dla takiego przypadku wysokość pryzmy $h = 157$ cm jest większa od wysokości wewnętrznej pudła (119 cm) o 38 cm. Z tego względu do oceny stateczności poprzecznej wagonu podczas rozładunku przyjęto zalecany współczynnik stateczności K_{sp} , zmniejszając odpowiednio kąt φ .

5.1. ZSUWAJĄCA SIĘ MASA ŁADUNKU

Zsuwająca się po przechyleniu pudła o kąt $\alpha = 45^\circ$ masa ładunku po podłodze i burcie podczas rozładunku ma decydujący wpływ na stateczność poprzeczną wagonu i bezpieczeństwo rozładunku. Masa ta „ciągnie” wagon w kierunku wywrócenia go i wagon powinien się temu przeciwstawić masą własną. W omawianej metodzie przyjęto upraszczające założenie, że zsuwająca się masa ładunku ma kształt pryzmy (przekrój trójkątny), jako najbardziej zbliżony do rzeczywistości.

Dla zalecanego współczynnika stateczności $K_{sp} \geq 1,5$, co gwarantuje bezpieczny rozładunek wagonu, kąt φ może wynosić najwyżej 59° ($\varphi \leq 59^\circ$ wg tabeli 2 i 3) i to zarówno podczas rozładunku na torze poziomym jak i na łuku. Jedyne przy bezwietrznej pogodzie ($\Sigma M_w = 0$) kąt φ może wynosić 66° dla toru poziomego (tabela 2) i 69° dla łuku (tabela 3).

Dopuszczalne wymiary pryzmy (x i h) przy rozładunku na łuku są mniejsze niż dla toru poziomego, co ilustruje tabela 4.

Wymiary pryzmy ładunku w zależności od kąta φ

Tabela 4

parametr pryzmy	tor poziomy		tor na łuku	
	$\varphi = 59^\circ$	$\varphi = 66^\circ$ ¹⁾	$\varphi = 59^\circ$	$\varphi = 69^\circ$ ¹⁾
x [cm]	217,2	236,8	205,6	237,4
h [cm]	54,2	90,9	25,8	73,3
h' [cm] (wylot z pudła)	32,0	49,2	16,1	39,6
kąt pochylenia pryzmy do burty ζ [°]	$\varphi - \alpha = 14^\circ$	$\varphi - \alpha = 21^\circ$	$\varphi - \alpha - \beta = 7^\circ$	$\varphi - \alpha - \beta = 14^\circ$
Przekrój pryzmy $\frac{1}{2} \cdot x \cdot h$ [cm ²]	5886	10762	2652	8701

¹⁾ przy bezwietrznej pogodzie

Bardzo ważne jest utrzymanie (zachowanie) wysokości pryzmy h' na „wylocie” z pudła (rys.5 i 6).

Na torze poziomym wysokość $h' \approx 32$ cm jest jeszcze do utrzymania, ale na łuku utrzymanie $h' \approx 16,1$ cm może być problematyczne, zwłaszcza przy rozładunku materiału zlepiającego się np. gliny brylowatej.

Praktycznie pracownik obsługujący wagon podczas rozładunku ma bardzo ograniczony wpływ na wysokość pryzmy u wylotu z pudła h' . Może co najwyżej w niewielkim zakresie regulować prędkość przechylania pudła.

5.2. DZIAŁANIE PARCIA WIATRU

Istotny wpływ na stateczność wagonu podczas rozładunku ma wiatr. Suma momentów od sił parcia wiatru wynosi $\Sigma M_w = 0,4816 \cdot 10^6$ daNcm zarówno na torze poziomym jak i na łuku, co stanowi 47 % sumy momentów od sił ciężkości na łuku.

Podane w tabeli 2 i 3 w kol. 13 wartości współczynnika stateczności K_{sp} przy bezwietrznej pogodzie pokazują, o ile można by podwyższyć wartość kąta φ i zwiększyć przekrój zsuwającej się pryzmy ładunku. Dane takie podano w tabeli 4. Wynika z niej, że dla toru poziomego przekrój pryzmy może wzrosnąć o 83 % a dla toru na łuku nawet o 328% (ponad trzykrotnie).

Należy podkreślić, że przedział od pogody bezwietrznej do działania wiatru w porywach jest szeroki i w praktyce, podczas rozładunku, trudno jest oszacować siłę wiatru. Dla zapewnienia bezpieczeństwa podczas rozładunku najlepiej przeczekać chwile działania wiatru w porywach albo, jeżeli czekanie nie jest możliwe, zastosować specjalny zaczep ubezpieczający, mocowany do szyny po przeciwnej stronie odchylanej burty, co zabezpieczy wagon przed „wywróceniem się”. Jest to jednak kłopotliwe i czasochłonne (dokładne ustawienie wagonu w miejscu zsypu, mocowanie zaczepu do szyny, przechylenie pudła i wysypywanie ładunku, powrót pudła w położenie wyjściowe, demontaż zaczepu) i z tego względu używanie zaczepu może być sporadyczne, wyjątkowe.

Nie ma dla pojazdów szynowych wiarygodnych relacji między siłą parcia wiatru a jego prędkością np. jakie jest jednostkowe parcie wiatru (ile N na 1 m^2) dla prędkości wiatru 20 km/h, 50 km/h lub 80 km/h. Nie wiadomo, dla jakiej prędkości wiatru przyjęto w metodzie [2] parcie jednostkowe wiatru 500 N/m^2 , przyjmowane w pojazdach szynowych do obliczania oporów jazdy i sił bocznych. Być może dokładniejsze rozpoznanie tego zagadnienia pozwoliłoby zmniejszyć P_j dla mniejszych prędkości wiatru, które najczęściej występują podczas eksploatacji, i tym samym zwiększyć wysokość pryzmy h' przy zachowaniu współczynnika $K_{sp} \geq 1,5$.

5.3. PRZECHYŁKA TORU

Przechyłka toru (kąt β) ma dosyć istotny wpływ na stateczność wagonu podczas rozładunku, bo narzuca konieczność utrzymania wymiaru h' .

Wpływ przechyłki toru wynika z faktu, że suma momentów od sił ciężkości dla wagonu na torze poziomym wynosi

$$\Sigma M_Q = 1,4849 \cdot 10^6 \text{ daNcm a na łuku}$$

$$\Sigma M_Q = 1,0266 \cdot 10^6 \text{ daNcm, a więc na łuku } \Sigma M_Q \text{ jest}$$

mniej o 45 %, wskutek zmiany położenia środków ciężkości zespołów względem punktu obrotu wagonu „0”. Zmniejszenie przechyłki toru (kąta β) powoduje wzrost sumy momentów od sił ciężkości na łuku i orientacyjnie można przyjąć, że będzie to wzrost liniowy.

5.4. KONSTRUKCJA WAGONU

Konstrukcja wagonu ma również wpływ na stateczność wagonu podczas rozładunku. Wpływ ten dotyczy następujących zagadnień:

- zastosowany rodzaj zsypu: czy zsyyp jednostronny (rys.1a) czy zsyyp dwustronny (rys.1b). W przypadku zastosowania zsyypu dwustronnego należy zoptymalizować wartość dodatkowego kąta γ metodą symulacji komputerowej. Orientacyjnie wartość kąta γ może wynosić w granicach 7° do 15° . Zastosowanie zsyypu dwustronnego zmniejsza sumę momentów od ładunku ΣM_L , aczkolwiek wymaga bardziej skomplikowanego mechanizmu otwierania burty,
- jak najniższe położenie środków ciężkości mas pudła i ostoji, przez co zwiększa się suma momentów od masy własnej ΣM_Q na łuku (większe odległości od punktu obrotu wagonu „0”),
- obniżenie masy własnej pudła, co zmniejsza energię kinetyczną podczas przechylania i ogranicza wartość dodatkowego momentu „wywracającego” wagon podczas rozładunku (nie uwzględniany w metodzie [2]),
- spowolnienie prędkości przechylania pudła i opadania burty oraz „łagodnego” dochodzenia do punktu skrajnego przy otwarciu (uniknięcie na ile się da „uderzenia”),
- zastosowanie na wagonie specjalnego zaczepu ubezpieczającego, mocowanego „szybkosprawnie” do szyny, który może być pomocny w wyjątkowych przypadkach do „wymuszenia” stateczności poprzecznej wagonu.

Ogólnie biorąc, konstrukcja wagonu powinna zwiększać sumę momentów od masy własnej zespołów ΣM_Q i zmniejszać od masy ładunku ΣM_L , co pozwoli na zwiększenie kąta φ , a tym samym na zwiększenie wysokości zsuwającej się pryzmy h' , przy zachowaniu współczynnika stateczności $K_{sp} \geq 1,5$.

6. WNIOSKI

Z opracowania wynikają następujące wnioski:

1. Ogólnie metodę wg [2] należy ocenić pozytywnie. Pozwala ona na liczbowe określenie wartości współczynnika stateczności poprzecznej K_{sp} podczas rozładunku tego typu samowyładowczych wagonów towarowych i na porównywanie podobnych wagonów samowyładowczych ze względu na bezpieczeństwo rozładunku. Pewne wątpliwości budzą dwa poczynione założenia:
 - zalecany kąt $\varphi = 75^\circ$ (zwłaszcza dla zsyypu jednostronnego),
 - jednostkowe parcie wiatru $P_j = 500\text{ N/m}^2$.Przykładowe obliczenie stateczności dla konkretnego wagonu wykazało, że dla założonego współczynnika stateczności $K_{sp} \geq 1,5$, kąt $\varphi = 59^\circ$ zarówno na torze pozio-

mym jak i na łuku oraz w przypadku rozładunku przy bezwietrznej pogodzie kąt $\varphi = 66^\circ$ na torze poziomym i $\varphi = 69^\circ$ na łuku (dotyczy to zsyłu jednostronnego).

2. Na stateczność poprzeczną wagonu samowyładowczego podczas rozładunku istotny wpływ mają następujące cztery czynniki:
 - zsuwająca się (wysypująca się) masa ładunku,
 - działanie siły parcia wiatru,
 - przechyłka toru i
 - konstrukcja wagonu.
3. W przypadku projektowania nowego wagonu samowyładowczego lub istotnej modernizacji istniejących należy mieć na uwadze zagadnienia podane w pkt.5.4.
4. Należy dokładniej rozpoznać relacje między siłą parcia wiatru a jego prędkością, co może pozwolić na obniżenie wartości P_j .

5. Instrukcję obsługi wagonów samowyładowczych należy uzupełnić o sposób dokonywania przechylania pudła (spowolnić prędkość przechylania i nie dopuścić do „uderzeń” pudła).

LITERATURA

- [1] *Przepisy D1 - Przepisy techniczne utrzymania i eksploatacji nawierzchni na liniach kolejowych normalnotorowych użytku publicznego, wprowadzone Zarządzeniem nr 47 Ministra Komunikacji z dn. 01.06.1982, wchodzące w życie z dniem 01.05.1983r.*
- [2] *Normy dla obliczenia i projektowania nowych wagonów samowyładowczych (dumpkarów) kolei 1520 mm, opracowane przez kolej radziecką w 1987r.*
- [3] *Gąsowski W., Sobaś M. : O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (9). Pojazdy Szynowe nr 4/2002.*