Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

ACTA AGROPHYSICA

1

Józef Horabik

WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ZIARNA PSZENICY NA ROZKŁAD OBCIĄŻENIA W ZBIORNIKU

Rozprawa habilitacyjna

Lublin 1994

Komitet redakcyjny
prof. dr hab. Jan Gliński
doc. dr hab. Krystyna Konstankiewicz
doc. dr hab. Ryszard Dębicki

Opiniował do druku
prof. dr hab. Janusz Haman

Wydawnictwo sponsorowane przez
Fundację Rozwoju Nauk Agrofizycznych

Adres redakcji
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-236 Lublin
tel. (0-81) 450-61

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 5513 9203
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1992-1994

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
Lublin 1994

ISBN 83-85491-27-9

Wydanie I. Nakład 150 egz.
Ark. wyd. 5.5, Ark. druk. 4.5
Skład: "Morpol", Pl. Litewski 2, 20-080 Lublin
Druk: "Tekst", ul. 1 Maja 51, 20-410 Lublin

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ 5

1. WSTĘP 7

2. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZIARNA ZBÓŻ 9
   2.1. Współczynnik tarcia zewnętrznego 9
   2.2. Oddziaływania cierne na elementarnym obszarze kontaktu ziarna 10
   2.3. Współczynnik tarcia wewnętrznego 11
   2.4. Anizotropia współczynnika tarcia wewnętrznego 12
   2.5. Sprężystość i lepko-sprężystość 13
   2.6. Równanie Janssena 14
   2.7. Podstawowe parametry mechaniczne ziarna zbóż w równaniu Janssena 15
   2.8. Wpływ sposobu napełniania i opróżniania na rozkład naporu 16

3. CEL PRACY 20

4. METODYKA BADAŃ 21
   4.1. Aparatura 21
   4.2. Metody napełniania i opróżniania zbiornika 24
   4.3. Materiał 26

5. STABILIZACJA WARUNKÓW POCZĄTKOWYCH EKSPERYMENTU 27

6. WPŁYW SPOSOBU NAPEŁNIANIA NA OBCIĄŻENIE ŚCIANY ZBIORNIKA 28
   6.1. Gęstość ośrodka 28
   6.2. Rozkład obciążeń statycznych 28
   6.3. Rozkład obciążeń dynamicznych 30
   6.4. Dynamiczne obciążenie ściany w momencie rozpoczęcia opróżniania 32

7. ANIZOTROPIA OŚRODKA GRANULARNEGO W RÓWNANIU JANSSENA 36
   7.1. Opis asymetrii obciążenia zbiornika 36
   7.2. Porównanie modelu z wynikami badań eksperymentalnych 40

8. NIECENTRYCZNE OPRÓŻNIANIE 45
   8.1. Asymetria obciążenia zbiornika 45
   8.2. Wypadkowy moment siły 48
   8.3. Metoda obliczania momentu siły 52

9. WPŁYW SPRĘŻYSTOŚCI ZIARNA NA OBCIĄŻENIE ŚCIANY ZBIORNIKA 55

10. DYSKUSJA 61

11. WNIOSKI 65

12. LITERATURA 67

SUMMARY 72

Acta Agrophysica Nr 1

Ważniejsze błędy dostrzeżone w druku

Strona	Wiersz	Jest	Powinno być
36	Rys. 13.	σ_3	σ_2
37	3 od dołu	σ_o	δ_o
38	7 od góry	$\frac{\Delta\delta}{\delta}$	$\frac{\Delta\delta}{\delta_o}$
52	12 od dołu wzór (26)	$\sqrt{r^2 + r_A^2 + 2rr_A\cos(\alpha + \alpha_A)}$	$\sqrt{r^2 + r_A^2 - 2rr_A\cos(\alpha - \alpha_A)}$

SPIS OZNACZEŃ

Oznaczenie	Opis	Jednostki
α_o	Kąt przesunięcia fazowego	stopnie
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Współrzędne kątowe głowic 1, 2, 3	stopnie
δ	Kąt tarcia wewnętrznego ośrodka	stopnie
$\Delta\delta$	Amplituda zmian kąta tarcia wewnętrznego	stopnie
δ_o	Wartość średnia kąta tarcia wewnętrznego	stopnie
ν	Kąt tarcia ziarna o ścianę zbiornika	stopnie
$\mu = \mathrm{tg}\,\nu$	Współczynnik tarcia ziarna o ścianę zbiornika	
ρ	Gęstość ośrodka	kgm^{-3}
σ_1, σ_2	Większe i mniejsze naprężenie główne	Nm^{-2}
σ_n	Naprężenie normalne w kierunku poziomym w ośrodku sypkim (napór poziomy ośrodka na ścianę)	Nm^{-2}
σ_t	Naprężenie styczne (napór styczny ośrodka na ścianę)	Nm^{-2}
σ_v	Naprężenie normalne w kierunku pionowym (napór pionowy ośrodka na dno)	Nm^{-2}
A	Amplituda zmian naprężenia normalnego i stycznego na przekroju elementarnej warstwy Janssena	
$ER = e/r_o$	Współczynnik niecentryczności otworu wysypowego	
D	Średnica zbiornika	m
e	Mimośród osi otworu wysypowego względem osi zbiornika	m
F_A, F_o	Parametry aproksymacji danych eksperymentalnych	N
F_z	Całkowita siła pionowa	N
F_1, F_2, F_3	Siły wskazywane przez głowice 1, 2, 3	N
g	Przyspieszenie ziemskie	ms^{-2}
H	Wysokość słupa ziarna w zbiorniku	m
H/D	Stosunek wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika	
k	Stała Janssena	
M	Wypadkowy moment siły wokół osi poziomej	Nm
M_x, M_y	Składowe wypadkowego momentu siły	Nm
R	Odległość głowic od osi symetrii zbiornika	m
R_1	Reszta szeregu Taylora	

Oznaczenie	Opis	Jednostki
R^2	Współczynnik determinacji	%
R_t	Wysokość nierówności	μm
r_o	Promień zbiornika	m
(r, α)	Układ współrzędnych biegunowych	
(r_A, α_A)	Współrzędne biegunowe otworu wysypowego	
(z, r, α)	Układ współrzędnych cylindrycznych	
(x, y)	Układ współrzędnych kartezjańskich	
z_o, z_1	Dolna i górna granica całkowania wzdłuż wysokości słupa ziarna w zbiorniku	

1. WSTĘP

Współczesne rolnictwo i przemysł przetwórczy ściśle związane są z transportem i składowaniem coraz to większych ilości ziarna zbóż i produktów przetwórstwa zbożowego. W celu zapewnienia prawidłowego funkcjonowania urządzeń do transportu i magazynowania ziarna niezbędna jest dokładna znajomość procesów mechanicznych zachodzących w roślinnym ośrodku granularnym. W ostatnich latach coraz powszechniej stosowane są lekkie, metalowe zbiorniki [80, 96, 98]. Bezpieczne funkcjonowanie takich zbiorników wymaga starannego przestrzegania warunków symetrii obciążenia ścian. Projektowanie tego typu zbiorników wiąże się z koniecznością bardzo dokładnego oszacowania naprężeń występujących w cienkiej ścianie zbiornika [12, 17].

Zdaniem specjalistów [78, 88, 95] projektowanie zbiorników na materiały granularne należy do najtrudniejszych zadań inżynierii budowlanej. Opinię tę zdają się potwierdzać liczne nadal na całym świecie przypadki uszkodzeń, bądź wręcz całkowitego zniszczenia zbiorników. Przykłady z praktyki wskazują, że przyczyną zniszczenia zbiornika mogą być błędne założenia projektowe [95], niecentryczne opróżnianie zbiornika [43], a nawet tak pozornie mało istotna sprawa jak anizotropia ośrodka granularnego spowodowana niesymetrycznym napełnianiem zbiornika [71]. Złożoność cech mechanicznych materiałów granularnych, nie w pełni zrozumiałe oddziaływania ziarna ze ścianą zbiornika, a nade wszystko brak prawa fizycznego materiału granularnego sprawiły, że niezadowalające są rezultaty prób ścisłego ujęcia mechaniki procesów zachodzących w zbiornikach. Dlatego też w praktyce projektowej powszechnie stosowane są uproszczone metody obliczeń bądź zalecenia uzyskane z badań empirycznych [44, 89]. Wiele norm konstrukcyjnych dotyczących budowy zbiorników na materiały granularne [1, 14, 18, 77, 79] przyjęło jako zasadę wyliczanie naporu na ściany zbiornika w oparciu o zmodyfikowane równanie Janssena [42]. Modyfikacje takie polegają na stosowaniu w obliczeniach stałych materiałowych ośrodka granularnego odmiennych dla fazy składowania oraz opróżniania, lub też na oszacowaniu obciążeń konstrukcji zbiornika w fazie opróżniania za pomocą rozwiązania poprawnego jedynie w fazie składowania i przemnożonego przez empiryczne współczynniki (stałe bądź zmieniające się wzdłuż wysokości zbiornika, zależne od jego geometrii i właściwości mechanicznych składowanego materiału granularnego), dobrane na podstawie doświadczenia tak, aby wyliczone ciśnienia były zbliżone do rzeczywistych [20, 57, 86, 95]. Badania eksperymentalne oraz przykłady z praktyki wskazują, że rozkłady naporu obliczane zgodnie z zalecanymi metodami nie odzwierciedlają zbyt precyzyjnie rzeczywistych obciążeń konstrukcji zbiorników, a niekiedy przekraczają znacznie wartości obliczone według norm [5, 9, 17, 41, 56, 74, 87].

W Polsce zagadnienia teoretyczne związane z wyznaczaniem rozkładu naporu materiału sypkiego w silosach podejmują prace Dreschera [19], Mroza i Szymańskiego [68] oraz Zawidzkiego [104]. Problemy projektowania silosów na materiały sypkie omawiają liczne monografie [9, 21, 47, 49, 59]. Wytyczne projektowania i budowy silosów żelbetowych na materiały sypkie i kiszonki zawiera norma PN-89/B-03262, zaś przemiany fizyko-chemiczne oraz biologiczne zachodzące w masie przechowywanego zboża omówił szczegółowo Tomczyk [101]. Badaniami eksperymentalnymi rozkładu naporu zajmuje się od szeregu lat założony przez prof. A. Mitzla Zespół Politechniki Wrocławskiej [20, 60, 83]. W pracach Kamińskiego [48] oraz Borcza [7, 8] można znaleźć obszerne porównania rozkładu naporu wielu materiałów sypkich (ziarno zbóż, nasiona roślin oleistych, mineralne materiały sypkie) wykonanych w skali naturalnej oraz na modelach w wielu różnych laboratoriach. Wyniki prezentowane w wymienionych pracach wskazują, że mechanizmy przenoszenia naprężeń w ośrodku sypkim oraz przekazywania naporu ośrodka na konstrukcje silosu nie są do końca rozpoznane. Uzasadnione jest więc przekonanie, że dokładniejsze zrozumienie właściwości mechanicznych materiałów granularnych oraz mechanizmów przenoszenia naprężeń w ośrodku musi stanowić podstawę opracowywania efektywnych metod wyliczania rozkładu obciążenia w silosie.

Problemy mechaniki ośrodków granularnych pochodzenia biologicznego są bardzo podobne do problemów napotykanych w mechanice bezkohezyjnych ośrodków sypkich, jak np. piasek. Zasadnicza różnica między tymi ośrodkami leży w wymiarze i kształcie ziaren oraz ich odkształcalności [55]. W niniejszej pracy szczególną uwagę zwrócono na te właściwości mechaniczne ziarna zbóż, które wyróżniają je spośród ośrodków granularnych i są przyczyną specyficznego zachowania się ośrodka.

2. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZIARNA ZBÓŻ

Manbeck i Nelson [55] wymieniają dwa mechanizmy deformacji decydujące o zachowaniu się ośrodka granularnego pochodzenia biologicznego poddanego działaniu sił zewnętrznych: reorientacja ziaren z jednego typu konfiguracji przestrzennej do drugiego oraz deformacja poszczególnych ziaren pod wpływem sił kontaktowych. Deformacja ośrodka jest złożoną kombinacją dwóch wymiennych mechanizmów. Przy małych naprężeniach dominującym mechanizmem deformacji ośrodka jest reorientacja ziaren, zaś przy wyższych zaczyna dominować deformacja poszczególnych ziaren. Tarcie ziarna o ziarno (tarcie wewnętrzne) oraz ziarna o powierzchnie konstrukcyjne (tarcie zewnętrzne) towarzyszy nieodłącznie deformacji ośrodka podczas składowania i przepływu ziarna oraz ma decydujący wpływ na rozkład naporu na ściany zbiornika [90].

2.1. Współczynnik tarcia zewnętrznego

Współczynnik tarcia ziarna zbóż o powierzchnie konstrukcyjne (współczynnik tarcia zewnętrznego) zależy od wielu czynników, wśród których za najważniejsze uważa się wilgotność ziarna, nacisk normalny, drogę poślizgu, strukturę powierzchni oraz warunki otoczenia.

Współczynnik tarcia na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności ziarna, zwłaszcza powyżej wilgotności 13% [11, 92, 93], chociaż dla niektórych materiałów występuje minimum przy wilgotności nie przekraczającej 15% [50]. Szczególnie interesujące spostrzeżenia wniosły badania Snydera i innych [92] przeprowadzone w komorze klimatyzacyjnej. Wykazały one decydujące znaczenie równowagi wilgotności ziarna i wilgotności względnej otoczenia w pomiarze współczynnika tarcia. Thompson i Ross [97] stwierdzili występowanie maksimum współczynnika tarcia ziarna pszenicy dla wilgotności ziarna 20%. Przy tej wilgotności pojawia się wolna woda między trącymi powierzchniami, która osłabia wytrzymałość na ścinanie powstałego wiązania.

Badania eksperymentalne Thompsona i Rossa [97], Zhanga i innych [105], Balassy'ego i innych [4] oraz Molendy [61] wykazały, że współczynnik tarcia maleje ze wzrostem nacisku normalnego. Autorzy tłumaczą ten efekt mniejszym niż wprost proporcjonalny przyrostem naprężenia kontaktowego przy rosnącym obciążeniu normalnym. Wpływ drogi poślizgu na wartość współczynnika tarcia związany jest ze zmianą struktury powierzchni trącej zachodzącą podczas poślizgu. Thompson i inni [100] wykazali, że w przypadku wielokrotnego poślizgu ziarna wzdłuż tej samej powierzchni współczynnik tarcia zmalał o blisko 40%. Autorzy zbadali dokładnie skład chemiczny warstwy osadzającej się na powierzchni poślizgu stwierdzając, że jest to głównie kutyna pokrywająca początkowo powierzchnię ziarna. W efekcie długiej drogi tarcia kutyna zmienia w sposób istotny

stan struktury powierzchni poślizgu, co objawia się bardzo dużym obniżeniem wartości współczynnika tarcia oraz niwelacją różnic we współczynniku tarcia wynikających ze zróżnicowanych początkowych stanów powierzchni [97].

Zmniejszanie się wartości współczynnika tarcia o ścianę zbiornika w kolejnych testach przepływu ziarna na skutek wygładzania powierzchni oraz osadzania się kutyny powoduje wzrost wartości naporu poziomego. Pieper [74] zarejestrował 53% wzrost naporu poziomego spowodowany zmianą współczynnika tarcia o ścianę od wartości początkowej 0.56 podczas pierwszego przepływu do wartości 0.37 podczas dwunastego przepływu ziarna jęczmienia w modelowym silosie wykonanym ze sklejki. Pieper [76] proponuje uwzględniać wygładzenie ściany zbiornika na skutek osadzania się wosku lub oleju, po wielokrotnym powtarzaniu cyklu napełniania i opróżniania ziarnem zbóż oraz nasionami roślin strączkowych, poprzez zmniejszenie wartości współczynnika szorstkości ściany (stosunku kąta tarcia o ścianę do kąta tarcia wewnętrznego) o 0.1. Współczynnik tarcia o ścianę ma również wpływ na rodzaj przepływu. Mitzel i inni [60] badając kinematykę przepływu ziarna pszenicy w modelowym zbiorniku za pomocą promieni rentgenowskich stwierdzili istotny wpływ współczynnika tarcia o ścianę na kształt krzywych przepływu. Dla szorstkiej ściany występował przepływ rdzeniowy, zaś dla gładkiej ściany obserwowano przepływ masowy.

2.2. Oddziaływania cierne na elementarnym obszarze kontaktu ziarna

Przytoczone wyniki badań tarcia ziarna o różne materiały konstrukcyjne wskazują, że wyjaśnienia źródeł oporu tarcia należy szukać na najniższym poziomie oddziaływań, tzn. przez rozpoznanie zjawisk zachodzących na elementarnym obszarze kontaktu. Horabik i Molenda [31, 33, 34, 35] opracowali nowe metody pomiaru rzeczywistego pola powierzchni kontaktu ziarna z płaską powierzchnią oraz pomiaru siły tarcia na pojedynczym obszarze kontaktu. Za pomocą mikrofotografii w świetle odbitym mierzono powierzchnię kontaktu pojedynczego ziarna pszenicy z płytką szklaną. Równocześnie przy tych samych poziomach nacisku mierzono siłę tarcia pary ziarn o przesuwaną między nimi płaską płytkę o dokładnie zdefiniowanej chropowatości. Równoczesna analiza wyników pomiarów powierzchni kontaktu i siły tarcia dostarczyła nowych informacji o naprężeniach kontaktowych i elementarnych zjawiskach zachodzących na obszarze kontaktu pod obciążeniem. Pomiary rzeczywistej powierzchni kontaktu dla różnych wilgotności ziarna wykazały, że zależność powierzchni kontaktu od siły nacisku jest wystarczająco dokładnie dla praktyki opisywana przez wzór Hertza.

Wilgotność ziarna wpływa na współczynnik tarcia głównie poprzez zmianę sprężystości i wytrzymałości okrywy owocowo-nasiennej ziarna. Współczynnik tarcia istotnie wzrasta po przekroczeniu 13% wilgotności

ziarna. Chropowatość powierzchni kontaktu najsilniej spośród wszystkich czynników wpływa na wartość współczynnika tarcia. Istotna jest zarówno chropowatość powierzchni konstrukcyjnej jak i chropowatość powierzchni ziarna. Wysokość nierówności powierzchni ziarna mieści się w przedziale 5-10 μm zależnie od odmiany, warunków uprawy, klimatu itp. i decyduje o właściwościach ciernych ziarna [24, 61]. W przedziale nierówności powierzchni konstrukcyjnej nie przekraczającym nierówności powierzchni ziarna (poniżej 10 μm) zachodzi najszybszy wzrost współczynnika tarcia ze wzrostem wysokości nierówności. Przy nierównościach powierzchni większych od 10 μm zachodzi również dalszy, jednak znacznie wolniejszy, wzrost współczynnika tarcia. W przypadku powierzchni gładkiej opór tarcia pochodzi głównie od oddziaływań adhezyjnych pomiędzy okrywą owocowo-nasienną ziarna i powierzchnią kontaktu. Wzrost chropowatości powierzchni powoduje zwiększenie udziału sił deformacyjnych w całkowitej sile tarcia. W przypadku skrajnie chropowatej powierzchni (przekraczającej kilkakrotnie chropowatość powierzchni ziarna) zachodzi ścieranie okrywy owocowo-nasiennej. W takim przypadku o granicznej wartości współczynnika tarcia decyduje wytrzymałość na ścinanie okrywy owocowo-nasiennej. Czynniki biologiczne takie jak: odmiana ziarna, powierzchniowa warstwa kutyny oraz struktura wewnętrzna ziarna modyfikują chropowatość oraz fakturę powierzchni ziarna, co wpływa istotnie na wartość współczynnika tarcia [24, 35, 40, 61].

2.3. Współczynnik tarcia wewnętrznego

Tarcie ziarna o ziarno (tarcie wewnętrzne) wyznacza graniczny stan naprężenia jaki może zaistnieć w ośrodku granularnym. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany powszechnie w oparciu o warunek plastyczności Coulomba-Mohra stanowi podstawę wyliczania granicznej wartości stosunku naprężenia poziomego do pionowego w ośrodku granularnym wewnątrz zbiornika (stała Janssena k).

Współczynnika tarcia wewnętrznego zależy od właściwości powierzchniowych ziaren. Czynnikami modyfikującymi właściwości powierzchniowe ziarna zbóż są: wilgotność ziarna, gatunek zboża i odmiana [3, 58]. Haman i Grochowicz [26] oraz Grochowicz [22] stwierdzili, że współczynnik tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy, podobnie jak współczynnik tarcia zewnętrznego, na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności ziarna. Minimum współczynnika tarcia stwierdzono dla wilgotności ziarna około 13%. Również gatunek ziarna i odmiana istotnie wpływają na współczynnik tarcia. Ziarna o pofalowanej oraz szorstkiej powierzchni mają większy współczynnik tarcia wewnętrznego [22, 23, 94].

Gęstość ośrodka oraz przestrzenna orientacja ziaren to dwa parametry struktury ośrodka wpływające na wartość współczynnika tarcia wewnętrznego. Ze wzrostem gęstości ośrodka wartość współczynnika tarcia wewnętrznego rośnie do pewnej granicznej wartości. Model ośrodka o wzmocnieniu

gęstościowym ujmuje w sposób ogólny wpływ gęstości początkowej ośrodka oraz drogi obciążenia na zależność naprężenie-odkształcenie [67].

2.4. Anizotropia współczynnika tarcia wewnętrznego

Ziarna zbóż są wyraźnie niesferyczne. W przypadku pszenicy długość ziarna jest około dwukrotnie większa niż jego szerokość. Jeżeli najdłuższe osie ziaren są zorientowane losowo, a ziarna upakowane z jednakową gęstością, to można oczekiwać, że powstały ośrodek będzie jednorodny i izotropowy. Jeśli jednak osie niesferycznych ziaren są równoległe do pewnego, wyróżnionego kierunku, to ośrodek objawia własności anizotropowe. Wartość kąta tarcia wewnętrznego zależy wtedy od kierunku poślizgu [71]. W kierunku równoległym do wyróżnionej orientacji najdłuższych osi ziaren kąt tarcia wewnętrznego jest najmniejszy, zaś w kierunku prostopadłym – największy.

Systematyczne badania wpływu struktury przestrzennego ułożenia granul na właściwości mechaniczne ośrodka zapoczątkował Oda [72]. Powstałą strukturę przestrzennego ułożenia granul opisał dwoma parametrami: przestrzenną orientacją niesferycznych granul oraz gęstością upakowania. Do opisu przestrzennej orientacji granul wprowadził dwie miary przestrzennego uporządkowania: kierunek wyróżnionej orientacji najdłuższych osi granul względem wybranego układu odniesienia oraz intensywność równoległego ułożenia najdłuższych osi granul. Oda [73] rozróżnia też dwa rodzaje anizotropii ośrodka wywołanej przestrzennym uporządkowaniem granul: anizotropię spowodowaną wyróżnionym kierunkiem ułożenia niesferycznych granul oraz anizotropię spowodowaną wyróżnionym kierunkiem koncentracji normalnych do punktów styku ziaren. Gdy ośrodek składa się z niesferycznych granul – mogą wystąpić obydwa wymienione typy anizotropii, natomiast gdy ośrodek składa się ze sferycznych cząstek może pojawić się jedynie drugi typ anizotropii.

Właściwości mechaniczne ośrodków sypkich wyznaczane w standardowych testach zależą bardzo silnie od sposobu przygotowania próbki ośrodka. Moysey [65] oraz Moysey i Hiltz [66] mierząc kąt tarcia wewnętrznego metodą bezpośredniego ścinania stwierdzili, że wynik pomiaru zależy bardziej od metody nasypywania ośrodka do pojemnika niż od rodzaju ośrodka granularnego. Horabik i Molenda [28, 30] oraz Szot i inni [94] wykazali, że kąt tarcia wewnętrznego ziarna zbóż mierzony metodą bezpośredniego ścinania oraz trójosiowego ściskania zależy od anizotropii wywołanej wstępną orientacją ziaren oraz kierunkiem obciążenia. Kąt tarcia wewnętrznego rósł ze wzrostem kąta zawartego między kierunkiem wyróżnionej orientacji ziaren a kierunkiem poślizgu. Maksymalna zmiana kąta tarcia wewnętrznego spowodowana wyróżnioną orientacją przestrzenną ziaren wynosiła około 4°. Również w przypadku sferycznych nasion rzepaku zaobserwowano wyraźny wpływ wyróżnionej orientacji kierunków normalnych do punktu kontaktu nasion na wartość kąta tarcia wewnętrznego.

2.5. Sprężystość i lepko-sprężystość

Ściśliwość ziarna zbóż, to cecha najbardziej odróżniająca ośrodki sypkie pochodzenia roślinnego od ośrodków sypkich pochodzenia mineralnego, w których odkształcenia poszczególnych granul są pomijalnie małe. Wilgotność ziarna pełni rolę szczególnie ważnego parametru, decydującego o charakterze odkształceń. W zakresie wilgotności do 13% odkształcenia ziarna można uznać w zasadzie za sprężyste, natomiast powyżej tej wilgotności udział części odkształcenia zależnej od czasu wzrasta bardzo szybko i przy wilgotności ziarna 18% stanowi już blisko połowę całkowitego odkształcenia. Badania Horabika i Molendy [34, 35] wykazały, że wzór Hertza sformułowany do opisu zależności naprężenie–odkształcenie w punkcie kontaktu sprężystej kuli z płaską powierzchnią poprawnie opisuje odkształcenie ziarna w obszarze kontaktu w szerokim zakresie wilgotności, w tym również odkształcenie lepko-sprężyste.

Przy niższych wilgotnościach ośrodek złożony z ziarna zbóż należy uznać za sprężysto-plastyczny, zaś przy wyższych wilgotnościach (powyżej 13%) – za lepko-sprężysto-plastyczny. Thompson i Ross [97] badając ściśliwość masy ziarna pszenicy w zakresie ciśnienia od 0 do 7 kPa stwierdzili, że w zakresie wilgotności ziarna od 8 do 12% połowa zmiany gęstości ośrodka pochodziła od reorientacji ziaren, a połowa od sprężystej deformacji ziaren. Wzrost wilgotności powodował wzrost udziału deformacji ziaren w zmianie gęstości ośrodka. Przy wilgotności ziarna równej 24% około 70% zmiany gęstości ośrodka pochodziło od deformacji ziaren. Podobnie Grundas i Horabik [25] badając proces pełzania i opóźnionej sprężystości masy ziarna pszenicy stwierdzili, że udział lepko-sprężystej deformacji ośrodka, zanikającej po usunięciu obciążenia, stanowi od 35 do 48% całkowitej zmiany objętości ośrodka zależnie od wilgotności ziarna. Bock i inni [6] badając proces relaksacji naprężeń masy ziarna pszenicy w aparacie trójosiowego ściskania stwierdzili istotną zależność lepko-sprężystego zachowania się ośrodka od wilgotności ziarna.

Jedną z cech ośrodka sprężysto-plastycznego są straty histerezy obserwowane zarówno w kierunku aktywnie działającego ciśnienia (na ogół w kierunku pionowym) jak i w kierunku prostopadłym. Straty histerezy w kierunku poziomym są dwukrotnie większe od strat w kierunku pionowym [55]. Za przyczynę tych strat uznaje się nieodwracalną reorientację ziaren oraz ich sprężystą deformację. Zhang i inni [106] adoptowali sprężysto-plastyczny model ośrodka sformułowany przez Ladego do opisu zachowania się masy ziarna pszenicy w złożonym stanie naprężenia. Model poprawnie opisuje proces cyklicznych obciążeń, histerezę w procesie obciążenie-odciążenie oraz wszystkie zjawiska typowe dla ośrodka sypkiego ze wzmocnieniem gęstościowym i deformacyjnym.

2.6. Równanie Janssena

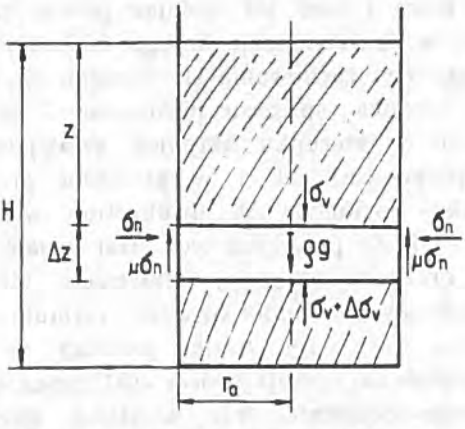
Podstawowa metoda uproszczonego obliczania naporu ośrodka sypkiego na ściany zbiornika sformułowana przez Janssena [42] w 1895 roku polega na rozwiązaniu różniczkowego równania równowagi sił działających na elementarną warstwę ośrodka o wysokości dz. Założeniem niezbędnym do rozwiązania różniczkowego równania równowagi sił w kierunku pionowym jest przyjęcie pewnego związku między pionowym i poziomym naprężeniem w elementarnej warstwie ośrodka. Związek taki powinien wynikać z prawa fizycznego materiału ziarnistego wypełniającego zbiornik oraz z warunków tarcia na jego ścianach. Janssen założył, że stosunek naprężenia normalnego w kierunku poziomym σ_n do naprężenia w kierunku pionowym σ_v jest stały na całej wysokości zbiornika:

$$\sigma_n/\sigma_v = k = \text{const.} \tag{1}$$

Ponadto założył stałą gęstość ρ ośrodka, oraz stałą wartość współczynnika tarcia ziarna o ścianę μ. Przy tych założeniach równanie równowagi elementarnej warstwy ośrodka (rysunek 1) jest równaniem liniowym, a jego rozwiązaniem jest funkcja wykładnicza określająca rozkład naporu poziomego σ_n wzdłuż wysokości ściany zbiornika:

$$\sigma_n(z) = \frac{\rho g r_o}{2\mu}\left(1 - \exp\left(-\frac{2k\mu z}{r_o}\right)\right) \tag{2}$$

gdzie:
g – przyspieszenie ziemskie,
r_o – promień zbiornika,
z – wysokość słupa ziarna w zbiorniku.



Rys.1. Równowaga sił działających na elementarną warstwę Janssena

Prostota równania Janssena oraz wartości rozwiązania zbliżone do obserwowanych doświadczalnie spowodowały, że równanie to stało się podstawą najbardziej rozpowszechnionej metody obliczania naporu ośrodka na ściany zbiornika. Równanie Janssena ulegało licznym modyfikacjom i rozszerzeniom. Mróz i Szymański [68] oraz Zawidzki [104] zastosowali równanie Janssena do opisu ustalonego przepływu dynamicznego, zaś Wol-Gajewska [103] do opisu nieustalonego przepływu dynamicznego. Horabik [29] wykazał, że równanie Janssena umożliwia uwzględnienie propagacji fali rozluźnienia przebiegającej od otworu wysypowego w górę, w głąb ośrodka, w chwili rozpoczęcia opróżniania. Wielu badaczy próbowało wyznaczyć doświadczalnie stałą Janssena k lub powiązać ją z właściwościami mechanicznymi ośrodka i geometrią zbiornika. Przyjęcie liniowego warunku plastyczności Coulomba-Mohra do określenia stanu naprężenia w ośrodku oraz uwzględnienie współczynnika tarcia materiału o ścianę zbiornika pozwala w sposób jednoznaczny określić wartość stałej Janssena k. Dokładną analizę zależności stałej k od kąta tarcia wewnętrznego ośrodka δ oraz kąta tarcia materiału o ścianę zbiornika ν dla różnych możliwych do spełnienia warunków brzegowych w elementarnej warstwie ośrodka w ujęciu Janssena przedstawił Drescher [19] oraz Moysey [64].

2.7. Podstawowe parametry mechaniczne ziarna zbóż w równaniu Janssena

Nadal pozostaje aktualne pytanie dotyczące stosowalności równania Janssena: dlaczego napór ośrodka sypkiego przewidywany przez powszechnie akceptowane równanie jest istotnie mniejszy od mierzonego doświadczalnie? Wydaje się, że przyczyną tej rozbieżności są, przynajmniej w części, właściwości fizyczne ośrodka, nie uwzględniane w sposób bezpośredni w równaniu Janssena, bądź przyjęte w tym równaniu jako stałe, a w rzeczywistości będące funkcjami innych parametrów. W przypadku ziarna zbóż oprócz parametrów tradycyjnie uznawanych za determinujace opór tarcia ośrodka granularnego, istotny jest również wpływ właściwości swoistych dla materiałów pochodzenia roślinnego. Najistotniejszym parametrem decydującym o większości właściwości mechanicznych ziarna jest wilgotność. Clower i inni [15] oraz Loewer i inni [51] określili eksperymentalnie wpływ naprężenia pionowego, wilgotności i wymiaru cząstek na wartość stałej Janssena k oraz gęstość roślinnych materiałów granularnych. Ross i inni [80] zaproponowali, aby do obliczania naporu ziarna zbóż stosować zmodyfikowaną, różniczkową postać równania Janssena, w której trzy stałe dotychczas parametry (gęstość ośrodka ρ, stała Janssena k, oraz współczynnik tarcia o ścianę zbiornika μ) będą wyrażone jako funkcje wilgotności ziarna oraz naprężenia pionowgo w warstwie ziarna. Metoda ta, wprowadzająca do równania Janssena eksperymentalne zależności wymienionych trzech właściwości mechanicznych

ziarna, pozwoliła częściowo wyjaśnić wyższy napór ziarna podczas opróżniania niż przewidywany przez klasyczne równanie Janssena.

2.8. Wpływ sposobu napełniania i opróżniania na rozkład naporu

Liczne badania eksperymentalne przeprowadzone na zbiornikach w skali naturalnej oraz na modelach wykazały, że sposób napełniania zbiornika jest bardzo istotnym czynnikiem decydującym o rozkładzie naporu ziarna na ścianę i dno zbiornika oraz o rodzaju przepływu [10, 48, 65, 69, 71, 91]. Nasypywanie ziarna strumieniem zwartym stwarza porowatą strukturę, co sprzyja przepływowi masowemu. Nasypywanie ziarna strumieniem rozproszonym stwarza strukturę bardziej zwartą, która sprzyja przepływowi rdzeniowemu, ale zapobiega samosortowaniu się ziarna [101]. Różne sposoby napełniania wytwarzają różną gęstość ośrodka oraz różną strukturę przestrzennego ułożenia granul. Zarówno gęstość ośrodka jak i rodzaj powstałej struktury wpływają bardzo istotnie na rozkład obciążenia konstrukcji zbiornika.

Boruszak i Sygulski [10] wykonując pomiary naporu rzepaku w modelowych zbiornikach stwierdzili, że napełnianie zbiornika strumieniem rozproszonym powoduje zmniejszenie naporu działającego na ściany komory zarówno po napełnienu jak i podczas opróżniania w porównaniu do napełniania strumieniem zwartym. Sumaryczne, pionowe obciążenie ściany zbiornika było również mniejsze podczas napełniania strumieniem rozproszonym, zaś podczas opróżniania zbiornika było większe niż w przypadku napełniania strumieniem zwartym.

Kamiński [48] badając wpływ metody napełniania zbiornika na wartość naporu poziomego i globalnego obciążenia pionowego ściany i dna modelowego zbiornika napełnianego ziarnem pszenicy zastosował trzy metody napełniania: strumieniem zwartym, rozproszonym oraz wzdłuż obwodu ściany zbiornika. Największe wartości naporu poziomego otrzymał autor również w przypadku zbiornika napełnianego strumieniem zwartym, zaś najmniejsze w przypadku napełniania wzdłuż obwodu ściany zbiornika, zarówno podczas napełniania jak i podczas opróżniania. Również całkowite pionowe obciążenie ściany było największe w przypadku napełniania strumieniem zwartym, zaś najmniejsze w przypadku napełniania wzdłuż ściany zbiornika. Uzyskane różnice naporu wyjaśnia autor różną gęstością ośrodka w przekroju poziomym warstwy. W przypadku napełniania strumieniem zwartym gęstość ośrodka jest największa wzdłuż osi zbiornika, zaś w przypadku napełniania wzdłuż ściany gęstość jest największa przy ścianie zbiornika. Zmiana gęstości ośrodka powoduje zmianę wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz zmianę stałej Janssena k.

Napełnianie zbiornika strumieniem rozproszonym stosował Moysey [65] oraz Williams i inni [102] w celu wyeliminowania płaszczyzny poślizgu powstającej w normalnych warunkach na skutek ześlizgiwania się ziarna po tworzącej stożka naturalnego usypu. Napełnianie zbiornika

strumieniem rozproszonym zwiększa istotnie gęstość ośrodka. W efekcie tego większy jest kąt tarcia wewnętrznego ośrodka, co w statyce zmniejsza poziomy napór na ścianę oraz zwiększa pionowy napór na dno [48, 65, 66].

Nielsen [71] wykazał, że nachylenie rury wlotowej ziarna względem osi zbiornika kierującej ziarno ku ścianie wytwarza silnie nierównomierny napór ziarna wzdłuż obwodu ściany. Taki rodzaj napełniania wytwarza różną gęstość ośrodka wzdłuż kierunku poziomego oraz wytwarza pewien wyróżniony kierunek orientacji ziarna. W efekcie tego po stronie wpadania ziarna do zbiornika napór na ścianę był istotnie większy niż przewidywany przez równanie Janssena. Według Nielsena [71] opis rozkładu naporu w zbiorniku rozpocząć należy od dokładnego opisu sposobu, w jaki poszczególne ziarna wpadające do zbiornika tworzą przestrzenną strukturę, różną przy różnych metodach napełniania.

Opróżnianie silosu przez otwór wysypowy nie pokrywający się z osią geometryczną zbiornika wywołuje złożony, znacznie odbiegający od symetrycznego, rozkład naporu poziomego na ściany komory. Złożoność oddziaływań sprawia, że do chwili obecnej brak jest jednoznacznego wyjaśnienia mechanizmu powstawania niesymetrycznego rozkładu naporu przy niecentrycznym opróżnianiu. Autorzy normy amerykańskiej [79] zwracają uwagę, że choć znane są metody oszacowania wpływu niecentrycznego napełniania i opróżniania na konstrukcję zbiornika, to jednak żadna z tych metod nie została dotąd zatwierdzona przez komitet normalizacyjny. W związku z tym normy budowlane zalecają jedynie podwyższenie dopuszczalnych wartości naporu na ściany zbiornika, bądź wręcz unikanie tego typu napełniania i opróżniania zbiorników [13, 43, 91]. Hampe i Flatau [27] do najważniejszych czynników decydujących o wielkości i rozkładzie poziomego naporu podczas niecentrycznego opróżniania zaliczają: lokalizację i ilość otworów wysypowych, geometrię komory zbiornika, właściwości ośrodka sypkiego, stadium opróżniania, czas trwania fazy opróżniania i rodzaj dna zbiornika.

Pieper [74] wykonując pomiary na modelowym zbiorniku z pszenicą oraz piaskiem stwierdził, że podczas niecentrycznego opróżniania największy napór poziomy występuje w środkowej strefie zbiornika po stronie otworu wysypowego. Opróżnianie przez otwór ulokowanego w połowie promienia zbiornika powodowało bardziej nierównomierny rozkład naporu niż opróżnianie przez otwór ulokowany bezpośrednio przy ścianie. Rozkład naporu wzdłuż wysokości zbiornika po stronie otworu wysypowego był zupełnie inny niż po stronie przeciwnej. Kamiński i Zubrzycki [46] stwiedzili, że w środkowej strefie zbiornika po stronie otworu wysypowego wraz ze wzrostem mimośrodu opróżniania napór pszenicy na ścianę zwiększał się osiągając wartość maksymalną dla mimośrodu otworu wysypowego równego $e=0.66r_o$. Ponadto wzrost mimośrodu opróżniania powodował wzrost naporu poziomego wzdłuż wysokości ściany zbiornika w przekrojach bocznych, zaś w przekrojach położonych po przeciwnej

stronie otworu wysypowego przy wzroście mimośrodu opróżniania wartości naporu nieznacznie malały. Kamiński i Zubrzycki [45] stwierdzili, że w dolnych strefach silosu po stronie otworu wysypowego wartości poziomego naporu podczas opróżniania były mniejsze niż w stanie spoczynku materiału sypkiego. Podobnie Thompson i inni [99], badając wpływ niecentrycznego opróżniania modelowego zbiornika na rozkład pionowego obciążenia ściany, stwierdzili, że w przypadku otworu wysypowego usytuowanego w połowie promienia zbiornika obciążenie ściany po stronie otworu wysypowego jest największe.

Łapko i Stachurski [52, 53] badając rozkład naporu poziomego na ścianę silosu zbożowego w skali naturalnej przy niecentrycznym opróżnianiu stwierdzili, że w przekrojach pionowych odległych o 45° od osi otworu wysypowego oraz w przekroju najbardziej oddalonym (180°) od osi otworu wysypowego następuje znaczny wzrost, a w przekrojach na linii otworu gwałtowny i znaczny spadek sił wewnętrznych w płaszczach żelbetowych walcowej komory silosu. Zdaniem autorów tak znaczne zróżnicowanie wartości naprężeń w cylindrycznej powłoce komory silosu świadczy o występowaniu bardzo nierównomiernego rozkładu naporu poziomego, zmiennego na obwodzie i wysokości komory. Łapko [54] przeprowadził ponadto obszerne badania efeków oddziaływania materiału sypkiego na ściany i dno silosów zbożowych w różnych możliwie najbardziej niekorzystnych warunkach eksploatacji. Ze względu na charakter zmienności naprężeń w ścianie autor wymienia trzy stadia opróżniania zbiornika: stadium przełączenia (skokowa zmiana naprężenia), stadium długookresowej pulsacji oraz stadium odciążania (zakończenie wysypu). Autor zwraca uwagę na istotny wpływ "drogi" obciążania, rozumianej jako kolejność uruchamianych otworów wysypowych, na wartość i rozkład naprężeń w ścianach podczas opróżniania zbiornika.

Rybiański [82] wykonując pomiary rozkładu obciążenia ścian modelowego zbiornika o kwadratowym przekroju napełnianego ziarnem pszenicy o wilgotności 13-14% stwierdził, że niecentryczne opróżnianie zwiększa wartości naporu ziarna, zmienia jego rozkład wzdłuż wysokości komór, a ponadto różnicuje napór dla poszczególnych ścian zbiornika. Dla ściany najbliższej do otworu wysypowego autor obserwował wyraźny wzrost naporu. Na wzrost ten składają się dwa czynniki: w miarę równomierny przyrost na całej wysokości komory oraz zlokalizowane najczęściej w dolnej strefie, charakterystyczne wybrzuszenie, nazwane strefą lokalnego wzrostu.

Kamiński [48] przeprowadził szczegółowe porównanie prezentowanych w literaturze wyników badań doświadczalych niecentrycznego opróżniania oraz wyników własnych badań modelowych z wytycznymi wielu norm. W konkluzji autor stwierdza, że proponowane w normach schematy obciążeń znacznie różnią się od wyników badań eksperymentalnych. Wspólnym elementem wielu prezentowanych rozkładów naporu poziomego uzyskiwanych w trakcie niecentrycznego opróżniania jest spadek wartości

naporu bezpośrednio po stronie otworu wysypowego w dolnej strefie silosu oraz znaczny wzrost naporu w środkowej strefie [27, 52, 53, 47, 48, 74]. Ponadto wielu badaczy stwierdziło znaczny wzrost naporu wzdłuż całej wysokości komory w przekrojach bocznych, a także czasem w dolnej strefie silosu po stronie przeciwnej do usytuowania otworu wysypowego [48].

Nierównomierny rozkład naporu podczas niecentrycznego opróżniania zmusza do poszukiwania dla celów praktycznych przybliżonego, zastępczego rozkładu obciążenia pozwalającego określić siły wewnętrzne w ścianie zbiornika z zadowalającą dokładnością. Jenike [43] oraz Colijn i Peschl [16] opierając się na założeniu, że nad otworem wysypowym zachodzi przepływ rdzeniowy proponowali przyjęcie spadku naporu poziomego po stronie otworu wysypowego. Pieper [75] proponował przyjęcie w dolnej części komory spadku naporu w obrębie rdzenia przepływu oraz lokalny wzrost naporu na granicy rdzenia. W środkowej strefie zbiornika autor proponował przyjęcie wzrostu naporu po stronie otworu wysypowego. W Polsce propozycję wyznaczania przybliżonego rozkładu naporu podczas niecentrycznego opróżniania, uwzględniającą parametry techniczne i eksploatacyjne silosu oraz rodzaj materiału sypkiego, opracował Kamiński [48]. Uwzględniając najważniejsze charakterystyczne cechy rzeczywistych rozkładów naporu autor zaproponował trzy różne schematy rozkładu obciążenia dla trzech stref wzdłuż wysokości zbiornika: spadek naporu poziomego w obrębie rdzenia przepływu oraz wzrost naporu na granicy rdzenia w dolnej strefie zbiornika, wzrost naporu po stronie otworu wysypowego w środkowej strefie oraz wzrost naporu po stronie przeciwnej do otworu wysypowego w górnej strefie. Zaproponowany schemat rozkładu naporu oparty jest na założeniu, że maksymalne wartości naporu poziomego powstają na granicy rdzenia przepływu, zaś w osi rdzenia napór jest równy zeru oraz, że rdzeń przepływu jest pochylony względem osi zbiornika.

Nierównomierny rozkład poziomego naporu materiału sypkiego na ściany, zmienny na obwodzie i wysokości, wywołuje w cienkich powłokach silosów znaczne momenty zginające, co prowadzić może do istotnych deformacji kształtu przekroju ściany [16, 43, 53, 70, 81]. Bucklin i inni [12] oszacowali wartość składowej poziomej wypadkowego momentu działającego na ścianę zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania w oparciu o różnicę wartości statycznego i dynamicznego współczynnika tarcia na dwóch przeciwległych ścianach zbiornika. Wartość tego momentu zależeć będzie od niecentryczności otworu wysypowego oraz od współczynnika tarcia ziarna o ścianę zbiornika.

3. CEL PRACY

Przedstawione powyżej rozważania wskazują, że problemy związane ze standaryzacją metod obliczeniowych zbiorników na materiały sypkie nie wynikają z braku powszechnie akceptowanej metody projektowania, lecz raczej z nie w pełni znanych i zrozumiałych oddziaływań fizycznych zachodzących pomiędzy poszczególnymi granulami ośrodka oraz ich oddziaływaniem z elementami konstrukcji zbiornika.

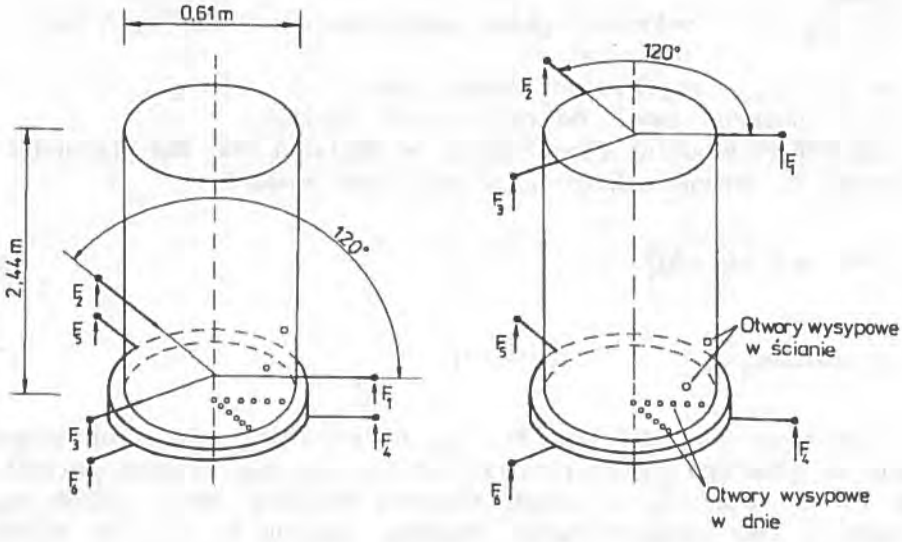
Celem niniejszej pracy jest rozpoznanie oraz opis wpływu właściwości mechanicznych ziarna pszenicy na rozkład obciążenia w zbiorniku i na przebieg procesów: napełniania, składowania i opróżniania. Powyższy cel pracy realizowano poprzez następujące etapy:

- wyjaśnienie wpływu sposobu napełniania zbiornika na rozkład obciążenia ściany i dna zbiornika,
- opracowanie metody uwzględnienia anizotropii ośrodka granularnego w równaniu Janssena,
- badanie wpływu niecentrycznego opróżniania zbiornika na rozkład obciążenia ściany i dna zbiornika,
- opracowanie metody obliczania momentu siły, wywieranego na ścianę i dno zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania, w oparciu o rozkład pionowego naporu na dno zbiornika,
- wyjaśnienie wpływu sprężystości ziarna na zmianę zwrotu wypadkowej siły tarcia o ścianę zbiornika.

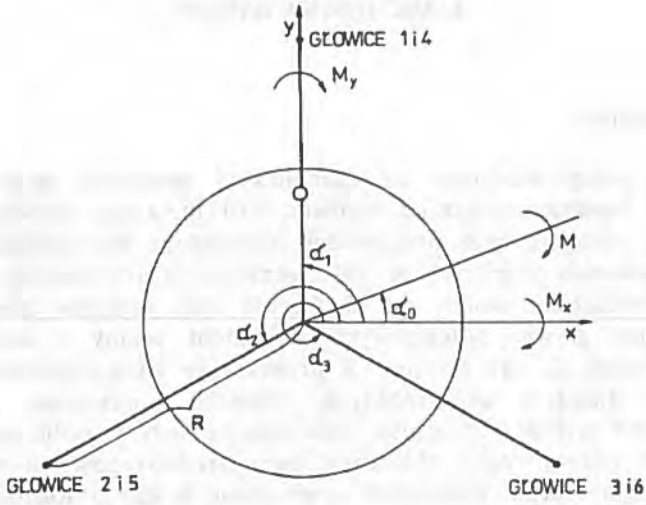
4. METODYKA BADAŃ

4.1. Aparatura

Badania przeprowadzono na modelowym zbiorniku wyposażonym w płaskie dno. Średnica zbiornika wynosiła 0.61 m, a jego wysokość 2.44 m. Cylindryczny zbiornik oraz płaskie dno zawieszone były oddzielnie, każde na trzech głowicach pomiarowych. Taka konstrukcja umożliwiała rozdzielenie pionowego obciążenia ściany od obciążenia dna. Schemat zbiornika oraz rozmieszczenie głowic pomiarowych względem ściany i dna zbiornika ilustruje rysunek 2, zaś rysunek 3 przedstawia rozmieszczenie głowic w biegunowym układzie współrzędnych. Głowice pomiarowe, na których zawieszony był cylinder zbiornika umieszczone były u dołu, na wysokości dna, bądź w górnej części zbiornika, bezpośrednio powyżej maksymalnej wysokości słupa ziarna. Oddzielne zawieszenie ściany zbiornika oraz jego dna na trzech głowicach umożliwia wyliczenie ze wskazań głowic całkowitego pionowego obciążenia dna (całkowitej pionowej siły tarcia w przypadku ściany) F_z oraz dwóch składowych wypadkowego momentu siły (M_x i M_y) względem punktu na osi symetrii zbiornika według następujących zależności:



Rys. 2. Schemat modelowego zbiornika na ziarno oraz rozmieszczenie głowic pomiarowych



Rys. 3. Rozmieszczenie głowic pomiarowych w biegunowym układzie współrzędnych

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 \tag{3}$$

$$M_x = R(F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 + F_3 \sin \alpha_3) \tag{4}$$

$$M_y = -R(F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 + F_3 \cos \alpha_3) \tag{5}$$

gdzie:

F_1, F_2, F_3 – wskazania głowic podpierających ścianę bądź dno zbiornika,

α_1, α_2, α_3 – współrzędne kątowe głowic,

R – odległość głowic od osi symetrii zbiornika.

Wartość bezwzględną wypadkowego momentu M oraz kąt przesunięcia fazowego α_o można wyliczyć z następujących związków:

$$|M| = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \tag{6}$$

$$\alpha_o = \arcsin\left(\frac{M_y}{M}\right) \qquad \text{dla } M \neq 0 \tag{7}$$

Trzy nowe wielkości (F_z, M, α_o) są niezależne od współrzędnych kątowych położenia głowic pomiarowych (α_1, α_2, α_3), którymi mierzono siły F_1, F_2 oraz F_3, a zatem stanowią dogodną miarę całkowitego nacisku i jego niecentryczności. Rozkład nacisku F_1, F_2, F_3 między trzema głowicami jest funkcją współrzędnych kątowych α_1, α_2, α_3 tych głowic. Aby znaleźć rozkład obciążenia pomiędzy poszczególnymi głowicami jako funkcję współrzędnych kątowych ich położenia, należy rozwiązać

układ równań (3), (4) i (5) ze względu na niewiadome F_1, F_2 oraz F_3, traktując F_z, M_x oraz M_y jako stałe parametry, zaś α_1, α_2 oraz α_3 jako zmienne niezależne. W przypadku rozmieszczenia trzech głowic co 120° rozwiązanie redukuje się do funkcji sinus jednej zmiennej niezależnej α_1:

$$F_1 = \frac{F_z}{3} + \left(\frac{2M}{3R}\right) \sin(\alpha_1 - \alpha_o) \tag{8}$$

$$F_2 = \frac{F_z}{3} + \left(\frac{2M}{3R}\right) \sin(\alpha_1 + 120° - \alpha_o) \tag{9}$$

$$F_3 = \frac{F_z}{3} + \left(\frac{2M}{3R}\right) \sin(\alpha_1 + 240° - \alpha_o) \tag{10}$$

Oznacza to, że rozkład obciążenia między poszczególnymi głowicami przebiega zgodnie z funkcją sinus współrzędnej kątowej głowicy α. Trzy parametry otrzymanego rozkładu: wartość średnia $\frac{F_z}{3}$, amplituda $\frac{2M}{3R}$ oraz kąt przesunięcia fazowego α_o stanowią miarę całkowitego obciążenia i jego niecentryczności. Zgodnie z przyjętą notacją kąt α_o oznacza kierunek i zwrot wypadkowego momentu siły M reakcji głowic podpierających ścianę bądź dno zbiornika, zaś przeciwny zwrot momentu siły wywieranego na ścianę bądź dno przez ośrodek sypki w zbiorniku wyznacza kąt α_o + 180°.

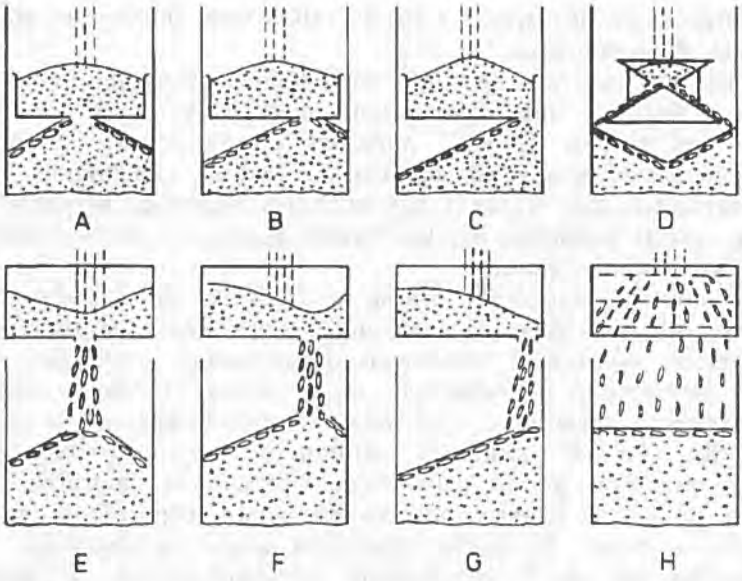
Ściana zbiornika wykonana była z gładkiej blachy ocynkowanej, ocynkowanej blachy falistej o amplitudzie 6.4 mm i długośći fali 63.5 mm albo z gładkiej blachy pokrytej papierem ściernym o gradacji 120 symulującym warunki tarcia zbliżone do tych, jakie występują na betonowej ścianie zbiornika. Współczynnik tarcia ziarna μ o trzy zastosowane powierzchnie wynosił odpowiednio: 0.2, 0.5 oraz 0.85. Otwory wysypowe w płaskim dnie zbiornika usytuowane były wzdłuż dwóch osi: jedna oś pokrywała się z kierunkiem, wzdłuż którego umieszczone były głowice podpierające ścianę i dno zbiornika, zaś druga oś przecinała w połowie kąt między kierunkami dwóch sąsiednich głowic, co ilustruje schematycznie rysunek 2. Stosunek mimośrodu e otworu wysypowego względem osi zbiornika do promienia zbiornika, nazwany współczynnikiem niecentryczności ER [32, 77], wynosił odpowiednio: 0, 0.167, 0.335, 0.5, 0.667, 0.833 oraz 1 dla poszczególnych otworów wysypowych. Otwory w dnie zbiornika miały średnicę 3.4 cm. Prędkość przepływu ziarna pszenicy względem ściany zbiornika wynosiła 2.9 m/h. Ze względów konstrukcyjnych otwór wysypowy w ścianie zbiornika (ER = 1) umieszczony był 19 cm powyżej dna zbiornika. Otwór ten miał średnicę 4.4 cm w celu zapewnienia identycznej z otworami w dnie prędkości wypływu ziarna [2].

Badania dotyczące zmiany zwrotu wypadkowej siły tarcia ziarna o ścianę zbiornika w końcowej fazie opróżniania powtórzono dodatkowo na zbiorniku o średnicy 0.4 m i wysokości 1.6 m. Zbiornik ten miał identyczny kształt oraz sposób zawieszenia ściany i dna jak omówiony już zbiornik o średnicy 0.61 m, natomiast konstrukcja zawieszenia zbiornika na głowicach tensometrycznych została wzmocniona tak, aby zminimalizować ugięcie dna i ściany zbiornika pod wpływem ciężaru ziarna. Pionowe ugięcie ściany zbiornika wynikające ze sprężystości głowic pomiarowych oraz konstrukcji zawieszenia nie przekraczało 0.05 mm, zaś pionowe ugięcie dna zbiornika nie przekraczało 0.20 mm. Maksymalne ugięcie dna zbiornika względem ściany pod wpływem ciężaru ziarna nie przekraczało więc wartości 0.15 mm. Ugięcie ściany i dna zbiornika mierzone było za pomocą czujników zegarowych podczas napełniania, spoczynku i opróżniania. W celu zbadania wpływu ugięcia konstrukcji zbiornika na rozkład obciążenia ściany i dna zbiornika, ugięcie dna zbiornika względem ściany zwiększono do wartości 0.3, 0.5 oraz 0.9 mm poprzez umieszczenie w konstrukcji zawieszenia dna elementów o odpowiednio dobranej sprężystości [37]. Zastosowano cztery średnice otworu wysypowego (24, 26, 30 oraz 34 mm) dające prędkości przepływu ziarna względem ściany zbiornika odpowiednio: 1.8, 3.0, 4.8 oraz 5.8 m/h.

4.2. Metody napełniania i opróżniania zbiornika

Zbiornik napełniano ośmioma różnymi metodami oznaczonymi schematycznie na rysunku 4 literami od A do H. W przypadku metod A, B, C, i D do napełniania używano specjalnego kosza umieszczonego wewnątrz zbiornika i podnoszonego do góry w miarę napełniania. W przypadku metody A ziarno tworzyło w zbiorniku regularny, symetryczny stożek naturalnego usypu. Ziarna wypływające z kosza ześlizgiwały się powoli po powierzchni stożka naturalnego usypu i na ogół układały się najdłuższą osią wzdłuż tworzącej stożka. Zjawisko to wykorzystano do wymuszenia preferowanej orientacji najdłuższych osi ziarna w zbiorniku wzdłuż wybranego kierunku [32, 36]. W tym celu otwór wysypowy w koszu umieszczano w połowie promienia (metoda B), lub przy ścianie zbiornika (metoda C). W przypadku metody D ziarno wypływało z kosza nasypowego wąską szczeliną wzdłuż całego obwodu ściany zbiornika, tworząc centryczny, wklęsły stożek naturalnego usypu [62].

W przypadku metod E, F i G ziarno wypływało z kosza umieszczonego 10 cm powyżej górnej krawędzi zbiornika jednym z trzech otworów i tworzyło centryczny (metoda E), przesunięty do połowy (metoda F), bądź przesunięty do ściany (metoda G) stożek naturalnego usypu. W metodach A, B, C i D ziarna traciły energię kinetyczną w koszu nasypowym, po czym bardzo powoli ześlizgiwały się po tworzącej stożka naturalnego usypu. Natomiast w metodach E, F i G ziarna uderzały z dużą prędkością w wierzchołek stożka, deformowały go, po czym



Rys. 4. Metody napełniania zbiornika

ześlizgiwała się w dół cała warstwa ziarna w przeciwieństwie do metod A, B, C i D, gdzie po tworzącej stożka ześlizgiwały się pojedyncze, lekko położone ziarna. W przypadku metod B, C, F i G (tzn. we wszystkich przypadkach niecentrycznego napełniania) w trakcie każdego powtórzenia eksperymentu zachowywano identyczne warunki napełniania i opróżniania, zaś położenie otworu w koszu nasypowym obracano o 60° w celu wyeliminowania wpływu niejednorodności ściany zbiornika na rozkład obciążenia. W metodzie H strumień ziarna był rozproszony na tyle, że nie powstawał nigdy stożek naturalnego usypu. W tym przypadku nad górną krawędzią zbiornika umieszczano kosz zawierający zestaw trzech sit o wymiarze kwadratowego oka równym 12 mm odległych od siebie o 15 cm. Zbiornik napełniano do tej samej wysokości słupa ziarna w przypadku każdej zastosowanej metody.

Centryczne napełnianie z kosza nasypowego umieszczonego powyżej zbiornika (metoda E) oraz centryczne opróżnianie wytwarzające względnie symetryczny rozkład obciążenia spełniały rolę metod odniesienia. Ten rodzaj napełniania i opróżniania zastosowano w badaniach wstępnych, które miały na celu stabilizację warunków ciernych na ścianie, a także w badaniach wpływu sprężystości ziarna na rozkład obciążenia ściany i dna. Centryczne napełnianie zastosowano w badaniach asymetrii obciążenia zbiornika powodowanej niecentrycznym opróżnianiem. W ocenie wpływu anizotropii ośrodka na asymetrię obciążenia zbiornika zastosowano metody napełniania A, B oraz C. Trzy wymienione metody wytwarzały identyczną

gęstość ośrodka oraz identyczne wartości całkowitego pionowego obciążenia ściany bądź dna zbiornika.

W badaniach wpływu sposobu napełniania zbiornika na całkowite obciążenie ściany i dna wykorzystano metody A, D, E, F, G i H. Pominięto zaś metody B i C ponieważ dawały identyczne całkowite pionowe obciążenie ściany jak metoda A. Metody napełniania E, F, G oraz H odzwierciedlają warunki napełniania występujące w praktyce, zaś metody A oraz D pozwalają uzyskać bardzo regularną, osiowo-symetryczną strukturę upakowania ziarna.

Po 30 minutach spoczynku ziarna w zbiorniku rozpoczynano proces opróżniania. W badaniach niecentrycznego opróżniania istotnym okazało się zapewnienie warunków ustalonego dynamicznego przepływu. W tym celu, aby zapewnić stałą wysokość słupa ziarna, a tym samym stałą wartość średniego obciążenia, wypływające ziarna dosypywano z powrotem do zbiornika. Po 30 minutach ustalonego przepływu rozpoczynano nieustalony przepływ, aż do całkowitego opróżnienia zbiornika.

Naciski na dno i ścianę zbiornika mierzono bezpośrednio w trakcie napełniania, w czasie 30 minut spoczynku ziarna w zbiorniku oraz w trakcie opróżniania w 1 minutowych odstępach czasu. W momencie rozpoczęcia opróżniania pomiary wykonywano co 0.1 sekundy, co 1 sekundę i co 15 sekund w miarę upływu czasu. Wskazania poszczególnych głowic tensometrycznych podpierających ścianę i dno zbiornika zbierano w przypadku zbiornika o średnicy 0.4 m na komputerze Amstrad 6128 za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego, zaś w przypadku zbiornika o średnicy 0.61 m na komputerze IBM PC za pośrednictwem zespołu do zbierania danych HP 3497A. Badania na zbiorniku o średnicy 0.61 m wykonane były na Wydziale Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Kentucky w USA, a na zbiorniku o średnicy 0.4 m w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Wszystkie pomiary wykonywano w sześciu powtórzeniach. Analizę statystyczną danych eksperymentalnych wykonano korzystając z programu Statgraphics 2.6.

4.3. Materiał

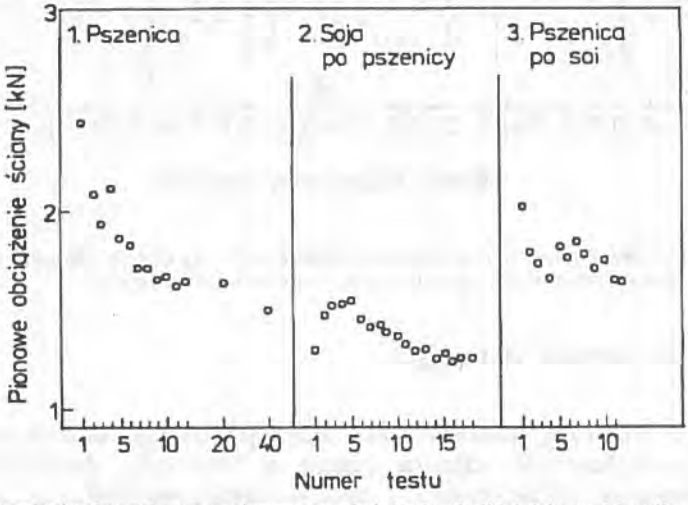
Pomiary wykonane w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie przeprowadzono na ziarnie pszenicy ozimej odmiany Grana o trzech poziomach wilgotności: 10%, 15% i 18%. Pomiary wykonane na Wydziale Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Kentucky w USA przeprowadzono na dwóch klasach pszenicy (wg klasyfikacji amerykańskiej): soft red winter wheat oraz hard red winter wheat, każda o wilgotności 12%. W dalszej części pracy wymienione dwie klasy pszenicy nazwano umownie pszenicą miękką oraz pszenicą twardą. Pszenica miękka miała gęstość usypną równą 766 kg/m^3, zaś pszenica twarda 780 kg/m^3. W celu uwzględnienia sferycznych nasion w badaniach anizotropii ośrodka granularnego pomiary przeprowadzono również na nasionach soi o wilgotności 10% i gęstości usypnej 710 kg/m^3.

5. STABILIZACJA WARUNKÓW POCZĄTKOWYCH EKSPERYMENTU

Podczas długotrwałego przepływu ziarna względem ściany zbiornika zachodzi ścieranie powierzchni ziarna. Kutyna pokrywająca początkowo powierzchnię ziarna osadza się wraz z pyłem i drobnymi zanieczyszczeniami na mikronierównościach ściany zbiornika zmieniając tym samym stan chemicznej aktywności powierzchni.

Wpływ powierzchniowej warstwy kutyny na wartość całkowitej siły tarcia ziarna o ścianę zbiornika jest tak duży, że zakłócałby badanie wpływu pozostałych czynników. Aby temu zapobiec przeprowadzono wstępną serię eksperymentów centrycznego opróżniania, trwającą tak długo, aż wypadkowa siła tarcia ziarna o ścianę zbiornika przestawała się zmieniać.

Rysunek 5 przedstawia zestawienie całkowitej siły tarcia ziarna o ścianę zbiornika w kolejnych testach opróżniania począwszy od pierwszego testu na oryginalnie nowym zbiorniku. W ciągu kilku pierwszych testów siła tarcia malała najszybciej. Po 40 pierwszych testach obciążenie ściany zmalało o 40%. Następną serię testów przeprowadzono na nasionach soi. W ciągu kilku pierwszych testów siła tarcia rosła, co wskazuje na ścieranie ze ściany zbiornika pozostałej po ziarnie kutyny, bądź na wymianę kutyny na inną substancję pochodzącą z nasion soi. Po kilku następnych testach siła tarcia łagodnie malała w miarę przeprowadzania kolejnego pomiaru. Następnie przeprowadzono kolejną serię testów przepływu ziarna pszenicy tej samej odmiany, która była użyta w pierwszej serii. Siła tarcia wzrosła w porównaniu do ostatniego testu pierwszej serii pomiarów (kolejna zmiana substancji pokrywającej ścianę), a następnie zmalała do tej samej wartości równowagowej.

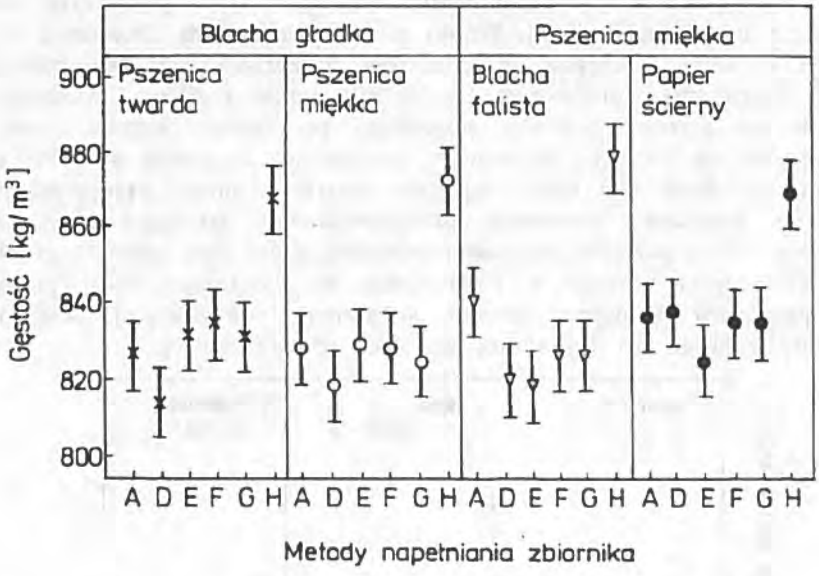


Rys. 5. Zestawienie dynamicznego pionowego obciążenia gładkiej ściany zbiornika w kolejnych testach opróżniania

6. WPŁYW SPOSOBU NAPEŁNIANIA NA OBCIĄŻENIE ŚCIANY ZBIORNIKA

6.1. Gęstość ośrodka

Napełnianie zbiornika strumieniem rozproszonym (metoda H) zwiększa istotnie (α = 0.05) gęstość ośrodka w zbiorniku (866 kg/m^3) w porównaniu do pozostałych metod napełniania wytwarzających gęstość w zakresie od 815 do 840 kg/m^3 zależnie od metody napełniania, rodzaju ziarna i rodzaju powierzchni ściany zbiornika. Gęstości ośrodka uzyskane w wyniku napełniania zbiornika metodami A, D, E, F i G nie różniły się istotnie między sobą. Wszystkie metody napełniania wytwarzały gęstość istotnie (α = 0.05) większą od gęstości usypnej równej 766 kg/m^3 w przypadku pszenicy miękkiej i 780 kg/m^3 w przypadku pszenicy twardej.

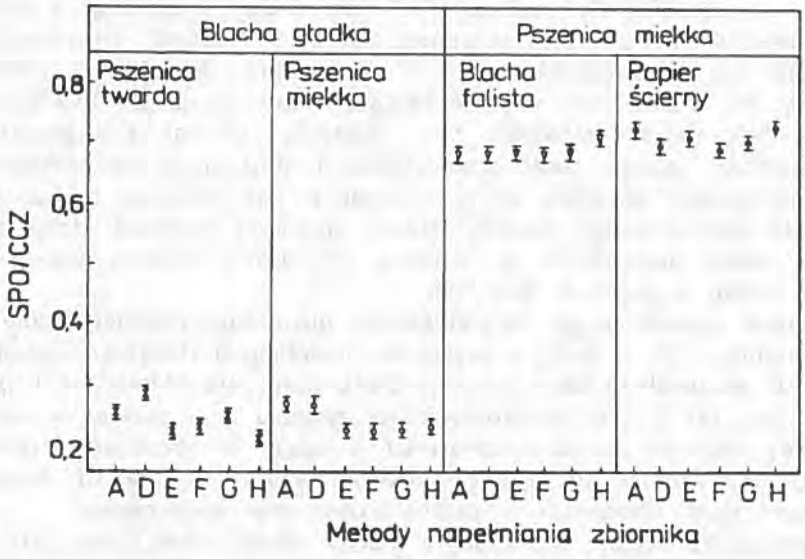


Rys. 6. Wartości średnie (wraz z 95% przedziałami ufności Tukey'a) gęstości pszenicy w zbiorniku w zależności od metody napełniania, rodzaju ściany zbiornika i rodzaju ziarna

6.2. Rozkład obciążeń statycznych

Rysunek 7 ilustruje stosunek statycznego pionowego obciążenia ściany zbiornika do całkowitego ciężaru ziarna w zbiorniku (SPO/CCZ) dla czterech wariantów eksperymentu i sześciu metod napełniania zbiornika. Zasadniczo większe wartości stosunku SPO/CCZ stwierdzono w przypadku

ściany wykonanej z blachy falistej oraz ściany pokrytej papierem ściernym (od 68 do 72%) w stosunku do ściany wykonanej z gładkiej blachy (od 24 do 30%). W przypadku ściany wykonanej z gładkiej blachy pionowe statyczne obciążenie ściany było największe przy zastosowaniu metod napełniania A oraz D. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje Moysey'a [65], z których wynikało, że im słabszą konstrukcję przestrzenną utworzą ziarna w procesie napełniania zbiornika, tym wyższa wartość poziomego naporu na ścianę powstanie w czynnym stanie naprężenia. Brak było istotnej różnicy w pionowym obciążeniu statycznym ściany między metodą H oraz metodami E, F i G w przypadku gładkiej ściany. Nie zaobserwowano istotnych różnic między metodami napełniania zbiornika w przypadku falistej ściany zbiornika oraz ściany pokrytej papierem ściernym, chociaż w przypadku napełniania strumieniem rozproszonym statyczne obciążenie ściany było największe w przeciwieństwie do wyników uzyskanych w przypadku gładkiej ściany.



Rys. 7. Wartości średnie (wraz z 95% przedziałami ufności Tukey'a) stosunku statycznego pionowego obciążenia ściany zbiornika do całkowitego ciężaru ziarna w zbiorniku (SPO/CCZ) dla czterech wariantów eksperymentu i sześciu metod napełniania zbiornika

Współczynnik tarcia ziarna o ścianę zbiornika jest parametrem decydującym o pionowym obciążeniu ściany. Wydaje się być słusznym założenie, że współczynnik tarcia ziarna o ścianę zbiornika nie wpływał na rodzaj struktury przestrzennego ułożenia ziaren otrzymywanej w wyniku zastosowanych metod napełniania. Wartość współczynnika tarcia ziarna o ścianę zbiornika wpływa jedynie na kierunek naprężeń głównych

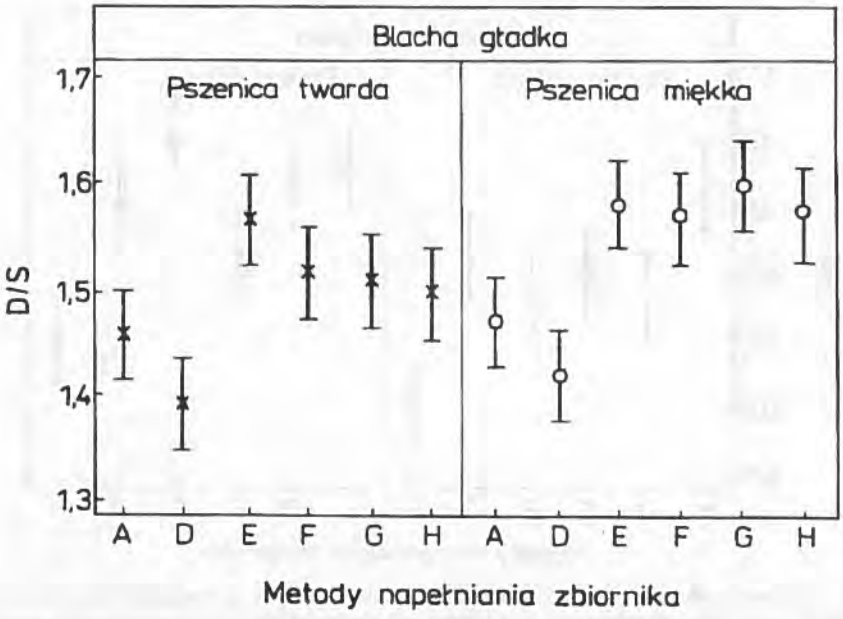
w ośrodku sypkim w najbliższym otoczeniu ściany. W przypadku gładkiej ściany kierunek większego naprężenia głównego w trakcie napełniania i spoczynku ziarna jest bliski pionowego (czynny stan naprężenia) i zmienia się w momencie rozpoczęcia opróżniania do bliskiego poziomemu kierunkowi (bierny stan naprężenia). W przypadku blachy falistej bądź ściany pokrytej papierem ściernym, gdy kąt tarcia o ścianę jest bliski lub nawet równy kątowi tarcia wewnętrznego, różnica między kierunkami większego naprężenia głównego w czynnym i biernym stanie naprężenia jest niewielka bądź znika zupełnie.

6.3. Rozkład obciążeń dynamicznych

Stosunek maksymalnej wartości pionowego dynamicznego obciążenia ściany do maksymalnego statycznego obciążenia ściany (D/S) zmieniał się wraz ze zmianą ściany jak również ze zmianą metody napełniania. Wartość średnia D/S dla gładkiej ściany równa 1.54 była istotnie większa od wartości średniej D/S równej 1.07 dla ściany wykonanej z blachy falistej oraz ściany pokrytej papierem ściernym. Wartości stosunku D/S otrzymane dla poszczególych metod napełniania wykazywały jednolitą tendencję: im wyższa była wartość obciążeń statycznych (SPO/CCZ) tym mniejsza była wartość stosunku D/S. Tendencja ta jest doświadczalnym potwierdzeniem metody obliczania stosunku poziomego do pionowego naprężenia (stałej Janssena k) w oparciu o kąt tarcia o ścianę oraz kąt tarcia wewnętrznego, według której mniejszej wartości stałej k w czynnym stanie naprężenia w ośrodku odpowiada większa wartość w biernym stanie naprężenia [19, 65].

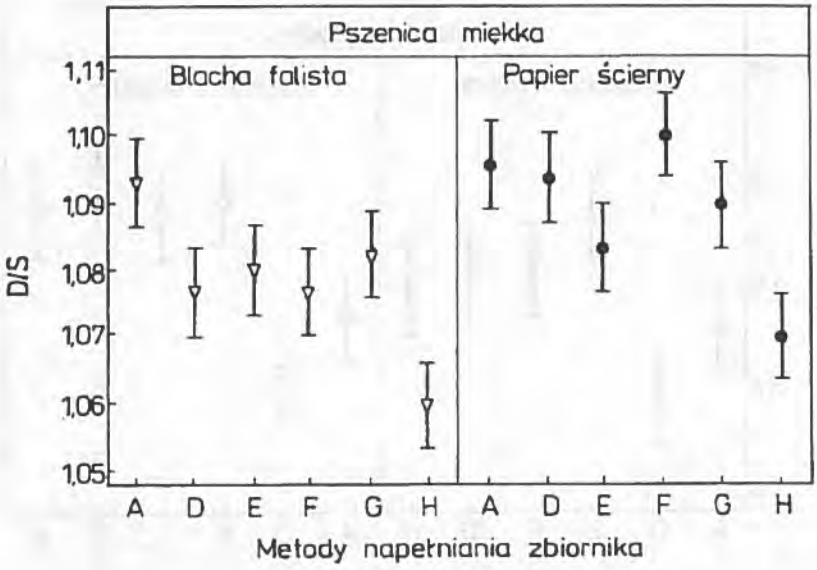
Stosunek dynamicznego do statycznego obciążenia gładkiej ściany był istotnie mniejszy (α = 0.05) w przypadku napełniania zbiornika metodami A i D niż pozostałymi czterema metodami, które nie różniły się istotnie między sobą, co zostało zilustrowane na rysunku 8. Oznacza to, że im delikatniej położone ziarna w zbiorniku, a zatem im luźniejsza struktura ośrodka, tym większe obciążenie statyczne ściany, ale za to mniejszy dynamiczny skok obciążenia w chwili rozpoczęcia opróżniania.

W przypadku ściany wykonanej z blachy falistej oraz ściany pokrytej papierem ściernym stosunek dynamicznego do statycznego obciążenia ściany (D/S) był istotnie mniejszy (α = 0.05) w przypadku napełniania zbiornika strumieniem rozproszonym (metoda H) niż w przypadku pozostałych pięciu metod, które nie różniły się istotnie między sobą. Oznacza to, że duża wartość współczynnika tarcia ziarna o ścianę zbiornika niweluje wpływ struktury przestrzennego ułożenia granul, uzyskiwanej poprzez różne sposoby napełniania, na rozkład obciążenia. Wyjątkiem jest przypadek napełniania strumieniem rozproszonym, powodujący duży przyrost gęstości ośrodka w porównaniu do pozostałych metod napełniania. Ziarna będące w kontakcie z gładką, pionową ścianą zbiornika w momencie rozpoczęcia przepływu masowego muszą pokonać



Rys. 8. Wartości średnie (wraz z 95% przedziałami ufności Tukey'a) stosunku dynamicznego do statycznego pionowego obciążenia gładkiej ściany zbiornika (D/S) dla miekkiej i twardej pszenicy oraz sześciu metod napełniania zbiornika

maksymalną wartość siły tarcia, aby mógł rozpocząć się ruch względem ściany. W literaturze jest to często nazywane w pełni zmobilizowanym tarciem [69]. Jeśli natomiast ściana jest wystarczająco szorstka, tak aby pozorny współczynnik tarcia o ścianę zależał jedynie od współczynnika tarcia wewnętrznego, wtedy nie ma jednoznacznej płaszczyzny poślizgu na ścianie, lecz ruch zachodzi w przyściennej warstwie ziarna o grubości równej kilku do kilkunastu wymiarów ziarna. Podobnie w przypadku ściany wykonanej z blachy falistej tarcie zachodzi w rzeczywistości nie na powierzchni ściany, lecz w obszarze ziaren przyległych do dolin falowego profilu blachy, podczas gdy w obszarach przyległych do wierzchołków fali ziarna są unieruchomione. W ten sposób efektywny współczynnik tarcia o blachę falistą, będący kombinacją tarcia ziarna o blachę na bardzo krótkim obszarze w pobliżu doliny fali oraz tarcia ziarna o ziarno na pozostałym obszarze, ma wartość niewiele mniejszą od współczynnika tarcia wewnętrznego [63]. Wyniki przedstawione na rysunku 9 wskazują, że obciążenie dynamiczne ściany wykonanej z blachy falistej było nieco mniejsze niż obciążenie ściany pokrytej papierem ściernym, na której współczynnik tarcia jest równy współczynnikowi tarcia wewnętrznego.



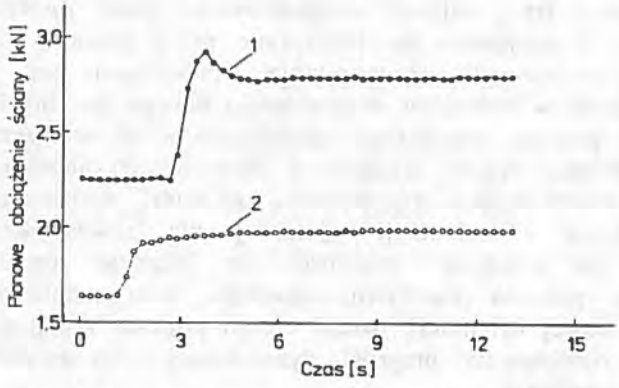
Rys. 9. Wartości średnie (wraz z 95% przedziałami ufności Tukey'a) stosunku dynamicznego do statycznego pionowego obciążenia ściany wykonanej z blachy falistej oraz ściany pokrytej papierem ściernym (D/S) dla sześciu metod napełniania zbiornika

6.4. Dynamiczne obciążenie ściany w momencie rozpoczęcia opróżniania

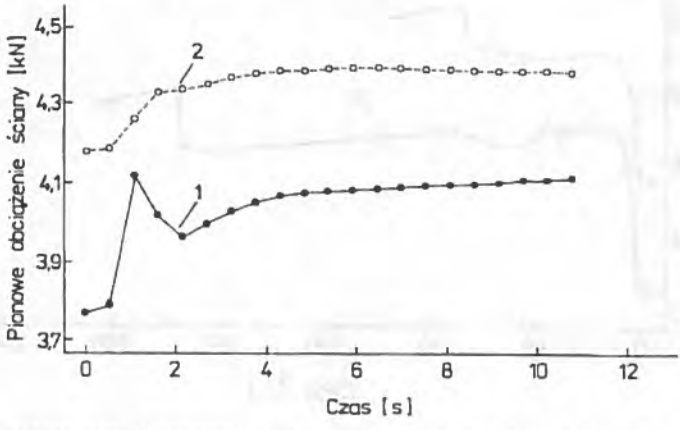
Rysunek 10 przedstawia przebiegi czasowe narastania dynamicznego pionowego obciążenia gładkiej ściany zbiornika w momencie rozpoczęcia opróżniania dla dwóch sposobów napełniania zbiornika: centrycznego (metoda E), oraz strumieniem rozproszonym (metoda H). Rysunek 11 przedstawia analogiczne przebiegi dla ściany wykonanej z blachy falistej. Zarówno rodzaj ściany jak i metoda napełniania zbiornika wpływa istotnie (α = 0.01) na wielkość dynamicznego skoku poziomego naporu w chwili rozpoczęcia opróżniania jak i na przebieg przyrostu pionowego obciążenia ściany w funkcji czasu. Największy przyrost dynamicznego obciążenia ściany (600 N) zarejestrowano w przypadku gładkiej ściany oraz centrycznego napełniania, zaś najmniejszy (200 N) w przypadku ściany wykonanej z blachy falistej oraz napełniania zbiornika strumieniem rozproszonym. Zamiana ściany gładkiej na blachę falistą odwraca całkowicie wpływ metody napełniania na przebieg krzywej obciążenia ściany w chwili rozpoczęcia opróżniania. Z tego też względu porównywanie wyników obciążeń uzyskanych na różnych zbiornikach należy uzupełniać szczegółowym opisem warunków ciernych panujących na ścianie zbiornika.

W przypadku centrycznego napełniania zbiornika wykonanego z gładkiej blachy, jak też zbiornika wykonanego z blachy falistej występował bardzo

krótkotrwały skok dynamicznego obciążenia ściany o czasie trwania od jednej do dwóch sekund. Maksymalna wartość skoku była większa w przypadku ściany wykonanej z blachy falistej. Natomiast w przypadku napełniania zbiornika strumieniem rozproszonym, skok pionowego obciążenia ściany miał dużo łagodniejszy przebieg, a jego wartość stanowiła około połowę skoku rejestrowanego w przypadku napełniania centrycznego. Zarejestrowane przebiegi narastania pionowego obciążenia ściany przypominają reakcję klasycznego układu drgającego z tłumieniem na skokowe wymuszenie. Rolę sprężyny pełni sprężystość ściany oraz konstrukcji zawieszenia, a rolę tłumika – tarcie ziarna o ścianę oraz tarcie ziarna



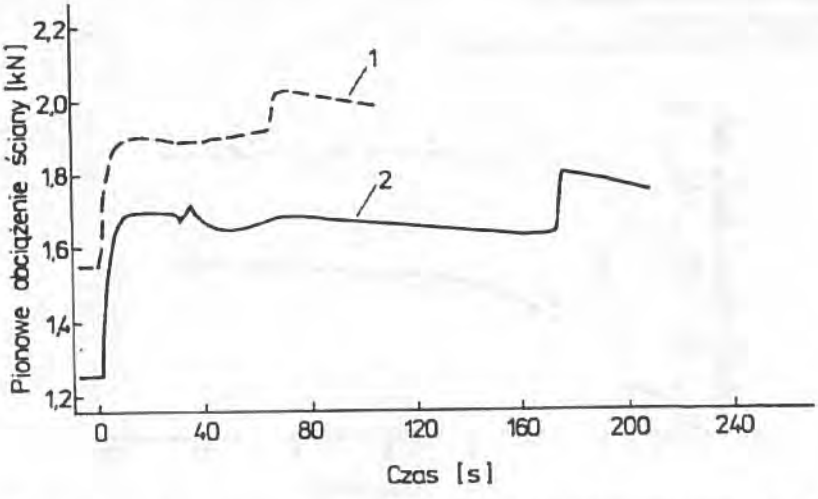
Rys. 10. Przebieg narastania dynamicznego pionowego obciążenia gładkiej ściany zbiornika w funkcji czasu dla dwóch metod napełniania
1 – napełnianie centryczne,
2 – napełnianie strumieniem rozproszonym



Rys. 11. Przebieg narastania dynamicznego pionowego obciążenia ściany zbiornika wykonanej z blachy falistej w funkcji czasu dla dwóch metod napełniania
1 – napełnianie centryczne,
2 – napełnianie strumieniem rozproszonym

o ziarno. Masą drgającą jest masa ściany, zaś wymuszeniem jest nagłe przeniesienie części obciążenia z dna zbiornika na ścianę w chwili rozpoczęcia opróżniania na skutek redystrybucji stanu naprężenia w ośrodku z czynnego – odpowiadającego fazie spoczynku, do biernego – odpowiadającego fazie opróżniania. W przypadku napełniania centrycznego tłumienie jest mniejsze od krytycznego, co powoduje, że pionowe obciążenie ściany zmienia się w sposób oscylacyjny. W przypadku napełniania strumieniem rozproszonym tłumienie jest większe od krytycznego, a zatem pionowe obciążenie ściany narasta w sposób asymptotyczny. Zależność tłumienia skoku naporu poziomego oraz całkowitego obciążenia ściany w chwili rozpoczęcia opróżniania od właściwości mechanicznych ośrodka potwierdzają skrajnie różne przebiegi przyrostu poziomego naporu jęczmienia oraz śruty sojowej zarejestrowane przez Zubrzyckiego [108] oraz pszenicy i jęczmienia zarejestrowane przez Zhanga i innych [107].

Podczas powtórnego uruchomienia opróżniania po 30 minutach spoczynku ziarna w zbiorniku obserwowano bardzo łagodny i wielokrotnie mniejszy niż podczas pierwszego opróżniania skok obciążenia jedynie w przypadku gładkiej ściany zbiornika i centrycznego napełniania. Podczas pierwszego uruchomienia opróżniania zachodzi reorientacja punktów kontaktu ziaren z orientacji właściwej dla zastosowanego sposobu napełniania, do orientacji właściwej dla biernego stanu naprężenia, występującego podczas przepływu masowego. Zatrzymanie przepływu nie niweluje tej nowej orientacji, dzięki czemu podczas kolejnych następnych uruchomień opróżniania przyrost dynamicznego obciążenia ściany jest wielokrotnie mniejszy.



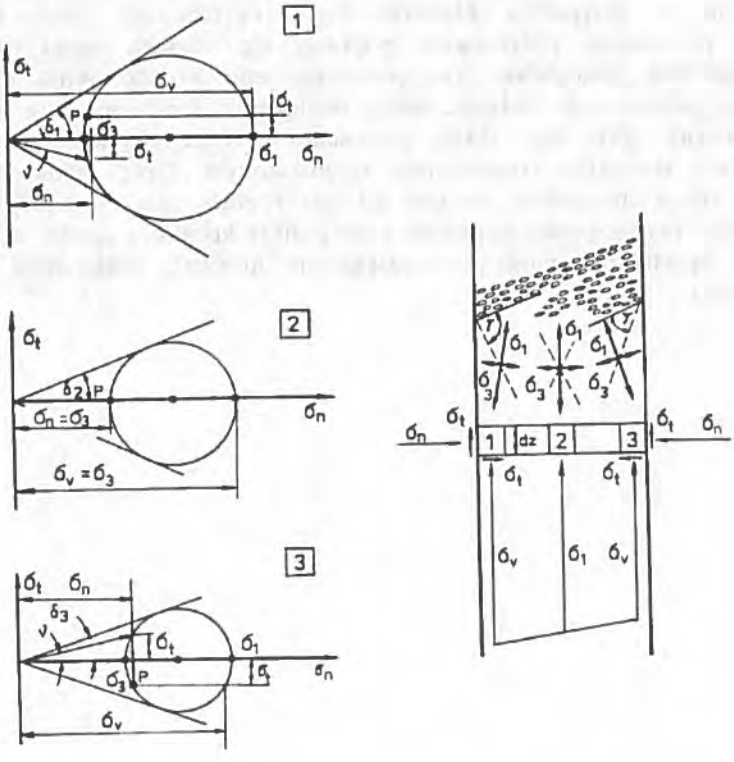
Rys. 12. Przebieg zmian dynamicznego pionowego obciążenia gładkiej ściany zbiornika napełnianego strumieniem rozproszonym
1 – ściana bez kutyny
2 – ściana pokryta kutyną

W przypadku zbiornika o gładkiej ścianie napełnianego strumieniem rozproszonym obserwowano dwukrotny skok dynamicznego obciążenia ściany: bezpośrednio po rozpoczęciu opróżniania oraz po czasie od jednej do trzech minut. Rysunek 12 przedstawia przebiegi narastania pionowego obciążenia ściany zbiornika w czasie 200 sekund od momentu rozpoczęcia opróżniania. Czas po jakim pojawiał się drugi skok obciążenia ściany zależał od wartości współczynnika tarcia ziarna o ścianę. Krzywa 1 przedstawia przebieg obciążenia ściany, z której usunięto kutynę, zaś krzywa 2 przedstawia analogiczny przebieg dla ściany pokrytej równowagową warstwą kutyny. Brak kutyny na powierzchni ściany spowodował wzrost statycznego obciążenia ściany o 300 N oraz skrócenie czasu, po jakim pojawiał się drugi skok obciążenia, z trzech do jednej minuty. Jeśli przepływ ziarna został zatrzymany przed pojawieniem się drugiego skoku obciążenia, a następnie po jakimś czasie ponownie uruchomiony, to drugi skok obciążenia pojawiał się po sumarycznym czasie opróżniania równym dokładnie odstępowi czasu między pierwszym i drugim skokiem obciążenia w przypadku niezakłóconego opróżniania. Jeśli natomiast podczas pierwszego opróżniania pojawiły się obydwa skoki obciążenia, to zatrzymanie przepływu oraz ponowne jego uruchomienie po jakimś czasie nie powodowało żadnego skoku obciążenia. Powtórny skok obciążenia spowodowany jest zbyt dużą gęstością ośrodka, wytworzoną podczas napełniania zbiornika strumieniem rozproszonym. Drugi skok obciążenia pojawia się w momencie na tyle dużego rozluźnienia struktury ośrodka, że kierunki przenoszenia naprężeń oraz punkty kontaktu ziaren wytworzone podczas napełniania mogą być zastąpione nowymi, właściwymi dla fazy opróżniania.

7. ANIZOTROPIA OŚRODKA GRANULARNEGO W RÓWNANIU JANSSENA

7.1. Opis asymetrii obciążenia zbiornika

Napełnianie zbiornika ziarnem poprzez boczny otwór w koszu nasypowym wytwarza wyróżnioną orientację najdłuższych osi ziaren wzdłuż kierunku oznaczonego schematycznie na rysunku 13. Kąt γ oznacza nachylenie kierunku preferowanej orientacji ziaren względem płaszczyzny poślizgu wyznaczonej w oparciu o spełnienie warunku plastyczności Coulomba-Mohra oraz warunku tarcia ziarna o ścianę zbiornika. Kąt γ ma najmniejszą wartość po stronie napełniania zbiornika, a największą po stronie przeciwnej. Różna wartość kąta γ na przekroju elementarnej warstwy ośrodka w zbiorniku powoduje, że różna jest również wartość



$$\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$$

Rys. 13. Elementarna warstwa Janssena z zaznaczonym kątem tarcia wewnętrznego δ zmieniającym się wzdłuż kierunku wyróżnionej orientacji ziarna

kąta tarcia wewnętrznego ośrodka na przekroju elementarnej warstwy. Po stronie napełniania zbiornika kąt tarcia wewnętrznego będzie najmniejszy, zaś po przeciwnej stronie zbiornika kąt tarcia wewnętrznego będzie największy [32, 36]. Podstawę wprowadzenia anizotropii ośrodka granularnego do równania Janssena stanowią następujące założenia:

1. kąt tarcia wewnętrznego nie jest stały na przekroju elementarnej warstwy Janssena, lecz zmienia się liniowo (jako pierwsze przybliżenie) wzdłuż poziomego kierunku, jako skutek wymuszonej orientacji ziaren,
2. kąt tarcia wewnętrznego jest najmniejszy po stronie napełniania zbiornika, a największy po stonie przeciwnej,
3. warunek plastyczności Coulomba-Mohra spełniony jest wzdłuż obwodu ściany oraz na środku warstwy ośrodka,
4. średnie ciśnienie $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ jest stałe na przekroju elementarnej warstwy ośrodka,
5. kąt tarcia ziarna o ścianę nie zależy od orientacji ziarna.

Zgodnie z powyższymi założeniami kąt tarcia wewnętrznego zmienia się liniowo wzdłuż kierunku wymuszonego przez orientację ziaren. W szczególności wzdłuż obwodu cylindrycznego zbiornika kąt tarcia wewnętrznego będzie zmieniał się zgodnie z przebiegiem funkcji sinus:

$$\delta(\alpha) = \delta_o + \Delta\delta \sin(\alpha + \alpha_o) \tag{11}$$

gdzie:

δ_o – wartość średnia kąta tarcia wewnętrznego na przekroju elementarnej warstwy ośrodka,

$\Delta\delta$ – amplituda zmian kąta tarcia wewnętrznego na przekroju elementarnej warstwy ośrodka,

α – współrzędna kątowa danego punktu,

α_o – kąt przesunięcia fazowego.

Uwzględniając związki trygonometryczne między naprężeniami głównymi (σ_1, σ_2), naprężeniem normalnym w kierunku poziomym σ_n kątem tarcia wewnętrznego δ oraz kątem tarcia ziarna o ścianę zbiornika ν, wynikajace z przyjęcia warunku Coulomba-Mohra, naprężenie normalne w kierunku poziomym σ_n można wyrazić za pomocą następującego związku:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\,\mathrm{tg}\,\nu} \sin\delta \sin\left(\arcsin\left(\frac{\sin\nu}{\sin\delta}\right) - \nu\right) \tag{12}$$

Rozwinięcie naprężenia σ_n wyrażonego związkiem (12) w szereg Taylora w otoczeniu punktu δ_o (przy założonej stałej wartości kąta tarcia o ścianę zbiornika ν) można wyrazić następująco:

$$\sigma_n(\delta_o + \Delta\delta) = \sigma_n(\delta_o) + \Delta\delta\sigma_n'(\delta_o) + R_1 \tag{13}$$

gdzie:

$\sigma_n(\delta_o + \Delta\delta)$ – wartość funkcji σ_n w punkcie $(\delta_o + \Delta\delta)$,

$\sigma_n(\delta_o)$ – wartość funkcji σ_n w punkcie δ_o

$\sigma_n'(\delta_o)$ – pierwsza pochodna funkcji $\sigma_n(\delta)$ w punkcie δ_o,

$$\sigma_n'(\delta_o) = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\mathrm{tg}\nu}\cos\delta_o\left(\sin\left(\arcsin\left(\frac{\sin\nu}{\sin\delta_o}\right) - \nu\right) - \frac{\sin\nu\cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin\nu}{\sin\delta_o}\right) - \nu\right)}{\sqrt{\sin^2\delta_o - \sin^2\nu}}\right)$$

R_1 – reszta szeregu Taylora.

Dla małych przyrostów kąta tarcia wewnętrznego, $\frac{\Delta\delta}{\delta_o} \leq 0.1$, reszta szeregu Taylora R_1 podzielona przez $\sigma_n(\delta_o)$ jest mniejsza niż $9 \cdot 10^{-4}$, a zatem względny błąd rozwinięcia wyrażenia $\sigma_n(\delta_o + \Delta\delta)$ w szereg Taylora z dokładnością do pierwszego wyrazu jest mniejszy niż $9 \cdot 10^{-4}$.

Dla małych przyrostów kąta tarcia wewnętrznego wokół wartości średniej δ_o można więc przyjąć, że naprężenie normalne σ_n jest w przybliżeniu liniową funkcją przyrostu kąta tarcia wewnętrznego $\Delta\delta$ zgodnie z wyrażeniem:

$$\sigma_n(\delta_o + \Delta\delta) \cong \sigma_n(\delta_o)\left(1 + \frac{\sigma_n'(\delta_o)}{\sigma_n(\delta_o)}\Delta\delta\right) \tag{14}$$

Biorąc pod uwagę sinusoidalną zależność kąta tarcia wewnętrznego δ od współrzędnej kątowej α punktów wzdłuż obwodu ściany zbiornika, wyrażoną równaniem (11), również napór poziomy σ_n wywierany przez ziarno na ścianę będzie zmieniał się wzdłuż jej obwodu zgodnie z przebiegiem funkcji sinus:

$$\sigma_n(\alpha) = \sigma_n(\delta_o)\left(1 + \frac{\sigma_n'(\delta_o)}{\sigma_n(\delta_o)}\Delta\delta\sin(\alpha + \alpha_o)\right) \tag{15}$$

Łącząc otrzymany rozkład naporu $\sigma_n(\alpha)$ wzdłuż obwodu ściany z rozwiązaniem Janssena, wyrażającym rozkład średniego naporu $\sigma_n(z)$ wzdłuż wysokości zbiornika, otrzymujemy dwuwymiarowy rozkład naporu $\sigma_n(z, \alpha)$ wzdłuż wysokości i obwodu cylindrycznego zbiornika:

$$\sigma_n(z, \alpha) = \sigma_n(z)(1 + A\sin(\alpha + \alpha_o)) \tag{16}$$

$$\sigma_t(z, \alpha) = \mu\,\sigma_n(z, \alpha) \tag{17}$$

gdzie:

$\sigma_n(z)$ – napór poziomy na wysokości słupa ziarna $z - z_o$,

$$\sigma_n(z) = \frac{\rho g r_o}{2\mu}\left(1 - \exp\left(-\frac{2k\mu}{r_o}(z - z_o)\right)\right)$$

μ = tgν – współczynnik tarcia ziarna o ścianę zbiornika,
r_o – promień zbiornika,
$k = \frac{\sigma_n}{\sigma_v}$ – stała Janssena,
$A = \frac{\sigma_n'(\delta_o)}{\sigma_n(\delta_o)}\Delta\delta$ – amplituda sinusoidalnego rozkładu naporu poziomego i stycznego,
ρ – gęstość ośrodka,
g – przyspieszenie ziemskie.

Nierównomierny rozkład naporu wzdłuż obwodu ściany zbiornika wytwarza moment siły. Dwie poziome składowe wypadkowego momentu względem początku układu współrzędnych można zapisać jako całki po współrzędnych cylindrycznych (z, α) dwóch składowych momentu, $z\sigma_n$ oraz $r_o\sigma_t$, pochodzących od naporu poziomego σ_n oraz stycznego σ_t:

$$M_x = \int_{z_o}^{z_1}\int_0^{2\pi} (r_o\sigma_t(z,\alpha) - z\sigma_n(z,\alpha))\, r_o \sin\alpha \, d\alpha \, dz \tag{18}$$

$$M_y = -\int_{z_o}^{z_1}\int_0^{2\pi} (r_o\sigma_t(z,\alpha) - z\sigma_n(z,\alpha))\, r_o \cos\alpha \, d\alpha \, dz \tag{19}$$

Podstawiając za napór poziomy σ_n oraz styczny σ_t wyrażenia (16) i (17) oraz wykonując całkowanie po współrzędnej kątowej α, otrzymujemy:

$$M_x = \pi r_o \cos\alpha_o \int_{z_o}^{z_1} A(r_o\sigma_t(z) - z\sigma_n(z))\, dz \tag{20}$$

$$M_y = -\pi r_o \sin\alpha_o \int_{z_o}^{z_1} A(r_o\sigma_t(z) - z\sigma_n(z))\, dz \tag{21}$$

W celu efektywnego wyliczenia momentu siły M należy znać jawną postać zależności amplitudy A sinusoidalnego rozkładu naporu σ_n oraz σ_t od współrzędnej z. Zakładając, że amplituda jest stała wzdłuż całej wysokości ściany zbiornika otrzymujemy następującą postać wyrażenia na wartość wypadkowego momentu siły:

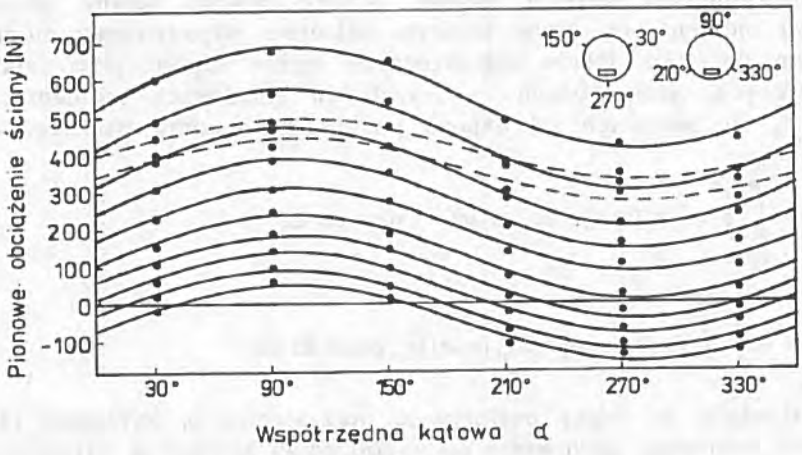
$$M = \pi r_o A \int_{z_o}^{z_1} (r_o\sigma_t(z) - z\sigma_n(z))\, dz \tag{22}$$

Po podstawieniu za $\sigma_t(z)$ i $\sigma_n(z)$ rozwiązania równania Janssena i wykonaniu całkowania otrzymujemy ostateczną postać wyrażenia na wypadkowy moment siły:

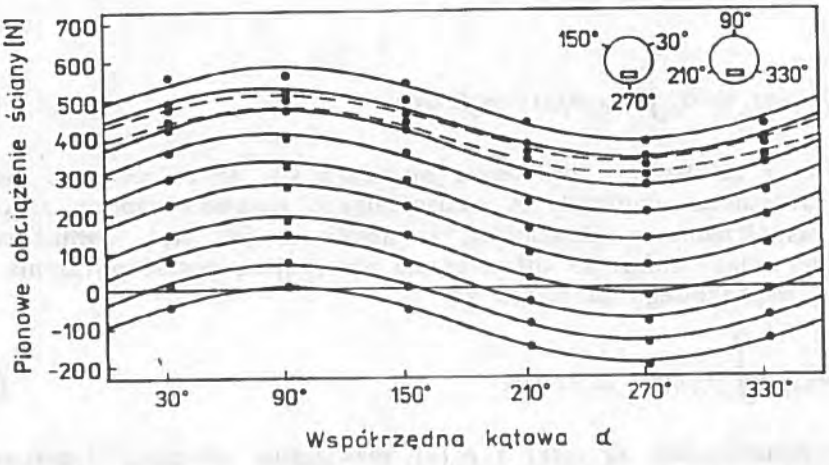
$$M = \frac{\pi r_o^2 A \rho g}{2}\left(r_o(z_1 - z_o) - \frac{z_1^2 - z_o^2}{2\mu} - \frac{r_o}{2k\mu^2}\left(r_o\mu - z_o - \frac{r_o}{2k\mu}\right) + \right. \tag{23}$$
$$\left. + \frac{r_o}{2k\mu^2}\left(r_o\mu - z_1 - \frac{r_o}{2k\mu}\right)\exp\left(-\frac{2k\mu}{r_o}(z_1 - z_o)\right)\right)$$

7.2. Porównanie modelu z wynikami badań eksperymentalnych

Rysunek 14 przedstawia rozkłady obciążenia głowic podpierających ścianę (ulokowanych powyżej wysokości słupa ziarna) otrzymane w



Rys. 14. Rozkład obciążenia między głowicami podpierającymi ścianę zbiornika podczas centrycznego opróżniania zbiornika napełnionego ziarnem pszenicy przez boczny otwór w koszu nasypowym



Rys. 15. Rozkład obciążenia między głowicami podpierającymi ścianę zbiornika podczas centrycznego opróżniania zbiornika napełnionego nasionami soi przez boczny otwór w koszu nasypowym

przypadku centrycznego opróżniania zbiornika napełnianego pszenicą poprzez boczny otwór w koszu nasypowym. Rysunek 15 przedstawia analogiczną sytuację dla nasion soi. Przedstawione punkty doświadczalne pochodzą z dwóch serii eksperymentów. W pierwszej serii otwór wylotowy kosza nasypowego umieszczony był nad głowicą o współrzędnej kątowej 270°. Z tej serii pochodzą dane doświadczalne dla współrzędnych kątowych głowic: 30°, 150° i 270°. W drugiej serii eksperymentów otwór wylotowy kosza leżał na dwusiecznej kąta zawartego między głowicami o współrzędnych kątowych 210° i 330°. Z tej serii eksperymentów pochodzą dane doświadczalne dla współrzędnych kątowych głowic: 90°, 210° i 330°. Rozkład obciążenia głowic aproksymowano sinusoidą:

$$F(\alpha) = F_o + F_A \sin(\alpha - \alpha_o) \tag{24}$$

gdzie:

$F_o = \frac{F_z}{3}$ – wartość średnia,

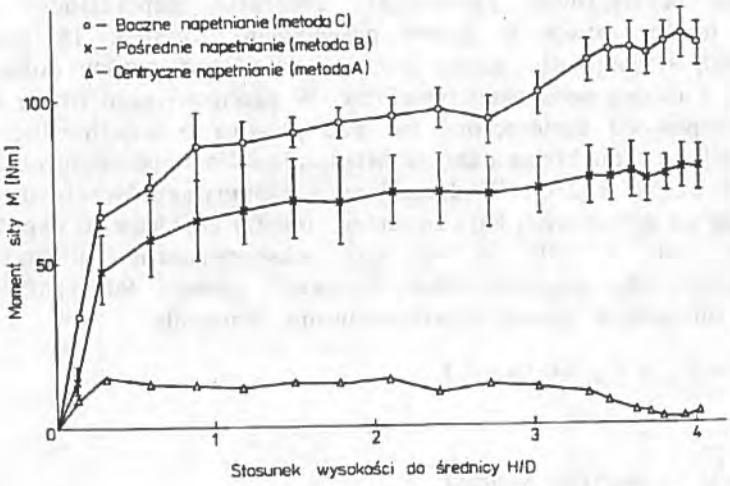
$F_A = \frac{2M}{3R}$ – amplituda,

zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów, po uprzednim wyznaczeniu wartości kąta przesunięcia fazowego α_o. W tabeli 1 zebrano przykładowe wartości parametrów aproksymacji dla chwili rozpoczęcia opróżniania.

Linie przerywane na rysunkach 14 i 15 oznaczają rozkłady obciążenia zmierzone bezpośrednio po napełnieniu zbiornika ziarnem (górna linia) oraz po 30 minutach spoczynku ziarna w zbiorniku (dolna linia). Linie ciągłe (począwszy od położonej najwyżej, ku dołowi) przedstawiają kolejne chwilowe rozkłady dynamicznego obciążenia ściany, mierzone w odstępach 4 minutowych, począwszy od chwili rozpoczęcia opróżniania. Współczynnik determinacji, R^2, był nie mniejszy niż 98% dla przypadku bocznego napełniania (metoda C), oraz nie mniejszy niż 85% dla przypadku pośredniego napełniania (metoda B). Minimum funkcji $F(\alpha)$ występowało zawsze po stronie napełniania zbiornika. W przypadku zawieszenia ściany zbiornika na głowicach umieszczonych powyżej wysokości słupa ziarna lokalizacji minimum funkcji rozkładu obciążenia $F(\alpha)$ odpowiada lokalizacja

Tabela 1. Parametry aproksymacji funkcją sinus rozkładu obciążenia głowic podpierających ścianę zbiornika

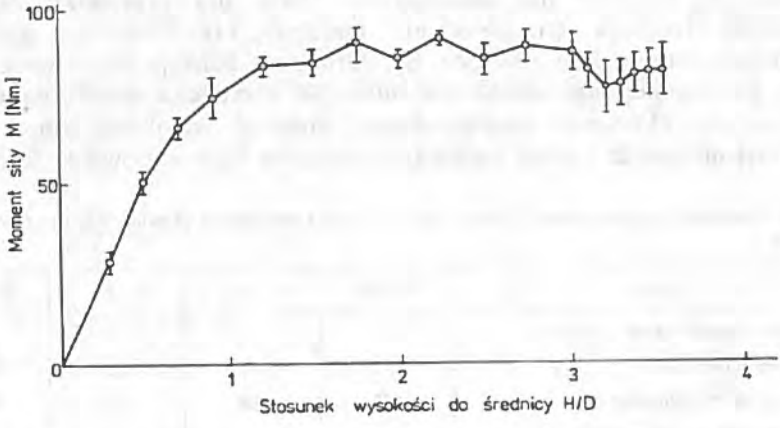
Proces	F_o [N]	F_A [N]	α_o [°]	R^2 [%]
Pszenica, opróżnianie centryczne				
– boczne napełnianie	552	149	- 10.8	98.3
– pośrednie napełnianie	495	93	- 7.2	98.9
Soja, opróżnianie centryczne				
– boczne napełnianie	487	100	1.8	87.0
Stosunek wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika H/D = 4				



Rys. 16. Wartości średnie (wraz z ich błędami standardowymi) momentu siły działającego na ścianę zbiornika w zależności od stosunku wysokości słupa ziarna pszenicy w zbiorniku do jego średnicy podczas centrycznego opróżniania dla trzech metod napełniania

maksimum naporu ziarna na ścianę. Wynika stąd, że w przypadku niecentrycznego napełniania napór ziarna na ścianę zbiornika jest większy po stronie napełniania niż po stronie przeciwnej.

Rysunki 16 i 17 przedstawiają wypadkowy moment siły działający na ścianę zbiornika podczas opróżniania. Kąt przesunięcia fazowego, α_0 określający odchylenie wyliczonej aproksymacji od oczekiwanego rozkładu obciążenia, nie przekraczał 10°. We wszystkich przypadkach niecentrycznego napełniania zbiornika moment siły działający na ścianę podczas opróżniania



Rys. 17. Wartości średnie (wraz z ich błędami standardowymi) momentu siły działającego na ścianę zbiornika w zależności od stosunku wysokości słupa nasion soi w zbiorniku do jego średnicy podczas centrycznego opróżniania dla przypadku bocznego napełniania

zbiornika był istotnie różny od zera (α = 0.01). Uzasadniona jest zatem teza, że przestrzenna orientacja ziarna, wytworzona w wyniku niecentrycznego napełniania zbiornika, istotnie zmienia rozkład obciążenia ściany zbiornika.

Dotyczy to zarówno anizotropii wywołanej orientacją niesferycznych ziaren (rysunek 16), jak również orientacją punktów kontaktu sferycznych nasion (rysunek 17). Dla porównania na rysunku 16 przedstawiono również przykładowe wartości momentu siły uzyskane w przypadku centrycznego napełniania i centrycznego opróżniania. Średnia wartość momentu dla całego procesu opróżniania wynosiła w tym przypadku 8.37 ± 4.61 Nm. Moment ten oraz rozrzut jego wartości wynikał z

Tabela 2. Zestawienie eksperymentalnych wartości momentu siły (średnie wraz z ich błędami standardowymi) oraz wyliczonych wartości amplitudy naporu poziomego i stycznego oraz amplitudy kąta tarcia wewnętrznego na przykładzie anizotropii wytworzonej poprzez boczne napełnianie zbiornika ziarnem pszenicy

Stosunek wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika H/D	Moment siły M [Nm]	Amplituda naporu poziomego i stycznego A	Amplituda kąta tarcia wewnętrznego $\Delta\delta$ [°]
4.00*	70.7 ± 7.0	0.006	0.20
4.00+	72.0 ± 11.4	0.006	0.20
4.00	117.5 ± 7.6	0.010	0.33
3.96	120.0 ± 8.0	0.011	0.37
3.84	117.5 ± 7.7	0.011	0.37
3.74	114.4 ± 6.9	0.012	0.37
3.64	116.4 ± 8.2	0.012	0.37
3.49	115.7 ± 6.9	0.012	0.37
3.35	112.5 ± 4.0	0.013	0.43
3.04	103.0 ± 7.0	0.013	0.43
2.73	95.0 ± 8.9	0.014	0.47
2.42	96.9 ± 5.7	0.018	0.60
2.12	95.3 ± 5.7	0.022	0.73
1.79	93.3 ± 5.5	0.028	0.93
1.50	90.9 ± 5.2	0.037	1.23
1.19	87.8 ± 6.8	0.054	1.80
0.89	86.2 ± 11.4	0.087	2.90
0.60	74.3 ± 3.9	0.156	5.20
0.29	65.5 ± 3.9	0.564	18.80
0.14	34.1 ± 0.7	0.982	32.70

Wartości parametrów użyte w obliczeniach:
$k = 0.4$, $\mu = 0.1$, $\delta_o = 25°$
* Bezpośrednio po napełnieniu
+ Po 30 minutach spoczynku ziarna

rozrzutu wartości współczynnika tarcia o ścianę, ograniczonej dokładności wykonania i zamocowania ściany oraz z losowej struktury ośrodka powstającej w trakcie napełniania.

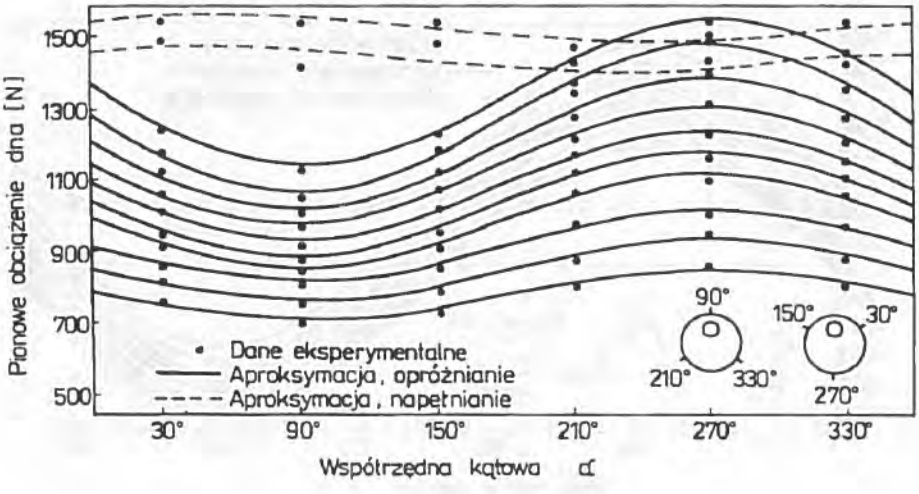
W tabeli 2 zestawiono wartości momentu siły M, wartości amplitudy naporu poziomego i stycznego A wyliczone w oparciu o równanie (23) oraz wartości amplitudy kąta tarcia wewnętrznego $\Delta\delta$ dla przypadku najsilniejszej anizotropii ośrodka tj. dla zbiornika napełnianego pszenicą przez boczny otwór w koszu nasypowym. W miarę obniżania się słupa ziarna w zbiorniku rosła amplituda kąta tarcia wewnętrznego $\Delta\delta$ niezbędna do wytworzenia zarejestrowanej wartości momentu siły M. Dla wartości stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) powyżej 1.19, czyli praktycznie podczas całego przepływu masowego, amplituda $\Delta\delta$ nie przekraczała 2°. Natomiast z chwilą pojawienia się przepływu rdzeniowego amplituda $\Delta\delta$ gwałtownie wzrastała na skutek pochylenia osi rdzenia przepływu i powstania niecentrycznego leja na swobodnej powierzchni ziarna. Ponieważ ta faza opróżniania nie jest ujęta w zaproponowanym modelu, stąd też amplituda zmian kąta tarcia wewnętrznego przyjmuje nienaturalnie duże wartości. Natomiast podczas przepływu masowego, czyli od chwili rozpoczęcia opróżniania, do momentu gdy stosunek wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) zmaleje do ok. 1.2, proponowany opis asymetrii obciążenia zbiornika w pełni odpowiada zachowaniu się ziarna, a wyliczona amplituda zmian kąta tarcia wewnętrznego mieści się w zmierzonym metodą trójosiowego ściskania zakresie zmian wywołanych wymuszoną orientacją ziarna.

8. NIECENTRYCZNE OPRÓŻNIANIE

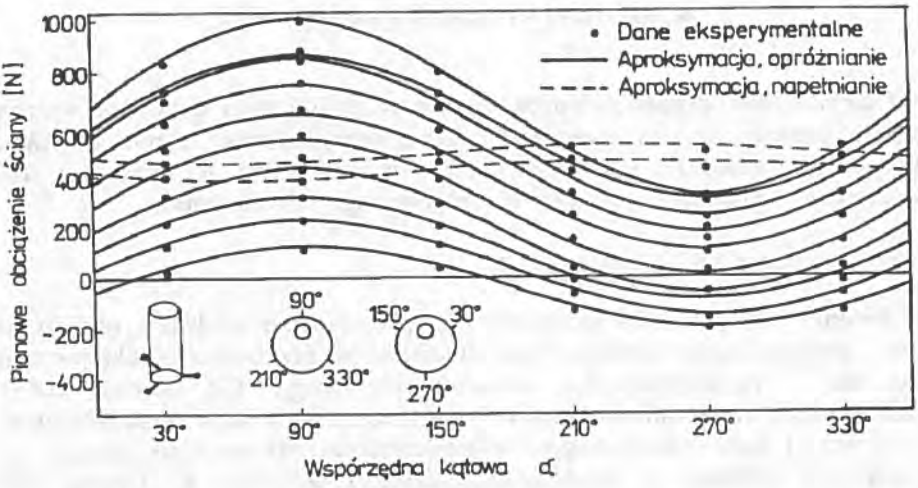
Celem badań przedstawionych w tym rozdziale było ustalenie wpływu niecentryczności otworu wysypowego oraz współczynnika tarcia o ścianę na wartość momentu siły wywieranego przez ziarno na ścianę i dno modelowego zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania.

8.1. Asymetria obciążenia zbiornika

Rysunki 18, 19 i 20 przedstawiają przykładowe rozkłady obciążenia głowic podpierających ścianę i dno zbiornika w przypadku gładkiej ściany zbiornika i niecentryczności otworu wysypowego ER równej 0.833. Przedstawione punkty doświadczalne pochodzą z dwóch serii eksperymentów. W pierwszej serii otwór wysypowy umieszczony był na linii łączącej oś zbiornika z głowicą o współrzędnej kątowej 90°, zaś w drugiej serii otwór wysypowy leżał na dwusiecznej kąta zawartego między głowicami o współrzędnych kątowych 30° i 150°. Z pierwszej serii pomiarów pochodzą dane doświadczalne zarejestrowane na głowicach o współrzędnych 90°, 210° i 330°, zaś z drugiej serii pochodzą dane zarejestrowane na głowicach o współrzędnych 30°, 150° i 270°, co zaznaczono schematycznie na rysunkach 18, 19 i 20. Rozkład obciążenia głowic aproksymowano sinusoidą (24) zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów, w sposób identyczny jak w rozdziale 7.2., dotyczącym wpływu anizotropii ośrodka

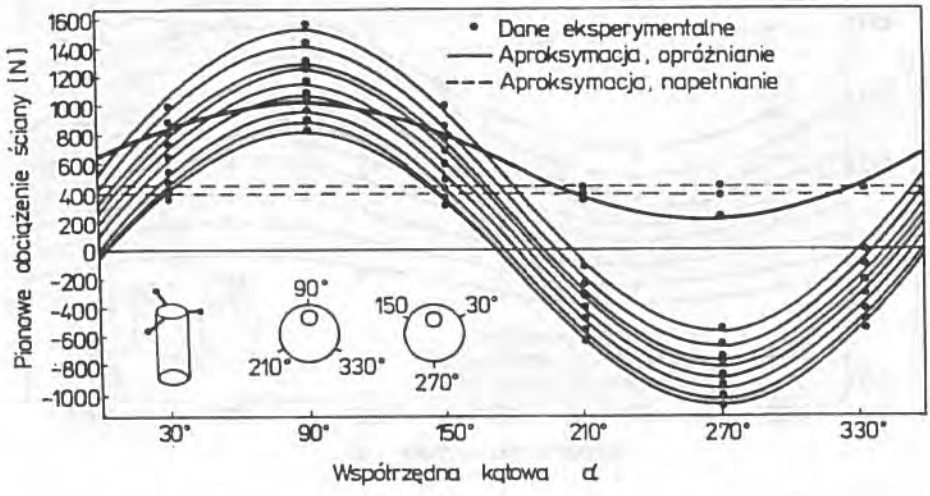


Rys. 18. Rozkład obciążenia głowic podpierających dno modelowego zbiornika wykonanego z gładkiej blachy podczas opróżniania przez otwór wysypowy o niecentryczności ER = 0.833



Rys. 19. Rozkład obciążenia głowic podpierających ścianę modelowego zbiornika wykonanego z gładkiej blachy podczas opróżniania przez otwór wysypowy o niecentryczności ER = 0.833

na rozkład obciążenia. Dane przedstawione na rysunku 19 pochodzą z eksperymentu, w którym głowice podpierające ścianę zbiornika umieszczone były w dolnej części zbiornika, 18 cm powyżej głowic podpierających dno zbiornika, podczas gdy rysunek 20 przedstawia dane pochodzące z eksperymentu, w którym głowice podpierające ścianę umieszczone były w górnej części zbiornika, powyżej wysokości słupa ziarna. Linie przerywane



Rys. 20. Rozkład obciążenia głowic podpierających ścianę modelowego zbiornika wykonanego z gładkiej blachy podczas opróżniania przez otwór wysypowy o niecentryczności ER = 0.833 (głowice podpierające ścianę umieszczone u góry zbiornika)

oznaczają rozkłady obciążenia bezpośrednio po napełnieniu zbiornika oraz po 30 minutach spoczynku. Linie ciągłe (począwszy od położonej najwyżej, ku dołowi) przedstawiają chwilowe rozkłady dynamicznego obciążenia mierzone w 4 minutowych odstępach czasu. Najniżej położona linia odpowiada stosunkowi wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornia H/D równemu 1.5, gdy kończył się przepływ masowy i rozpoczynał

Tabela 3. Wartości średnie (wraz z ich błędami standardowymi) momentu siły wywieranego na ścianę i dno modelowego zbiornika o gładkiej ścianie zawieszonej u dołu podczas opróżniania przez otwór wysypowy o niecentryczności ER = 0.833

Stosunek wysokości do średnicy zbiornika H/D	Ściana		Dno	
	Moment siły M [Nm]	Kąt przesunięcia fazowego α_0 [°]	Moment siły M [Nm]	Kąt przesunięcia fazowego α_0 [°]
4.00	238.6 ± 3.9	0.8 ± 1.1	170.5 ± 2.3	184.0 ± 2.5
3.88	279.1 ± 10.3	0.9 ± 1.2	164.4 ± 11.1	180.0 ± 1.2
3.62	264.2 ± 14.6	1.4 ± 1.0	151.1 ± 6.7	180.4 ± 1.1
3.32	246.8 ± 8.1	1.5 ± 1.0	137.8 ± 2.5	177.7 ± 1.4
3.02	230.6 ± 9.0	1.7 ± 1.1	128.9 ± 4.8	179.6 ± 1.1
2.72	225.5 ± 6.0	1.2 ± 0.9	124.6 ± 5.2	179.1 ± 1.3
2.42	210.6 ± 6.4	0.6 ± 1.0	112.7 ± 6.2	180.7 ± 1.4
2.12	176.9 ± 8.6	0.8 ± 0.8	85.3 ± 5.8	180.9 ± 1.1
1.82	161.4 ± 1.1	-1.1 ± 1.0	74.9 ± 5.1	183.1 ± 2.4
1.53	135.9 ± 2.6	-2.7 ± 1.8	61.2 ± 5.6	183.8 ± 2.5

Tabela 4. Wartości średnie (wraz z ich błędami standardowymi) momentu siły wywieranego na gładką ścianę modelowego zbiornika zawieszoną u góry podczas opróżniania przez otwór wysypowy o niecentryczności ER = 0.833

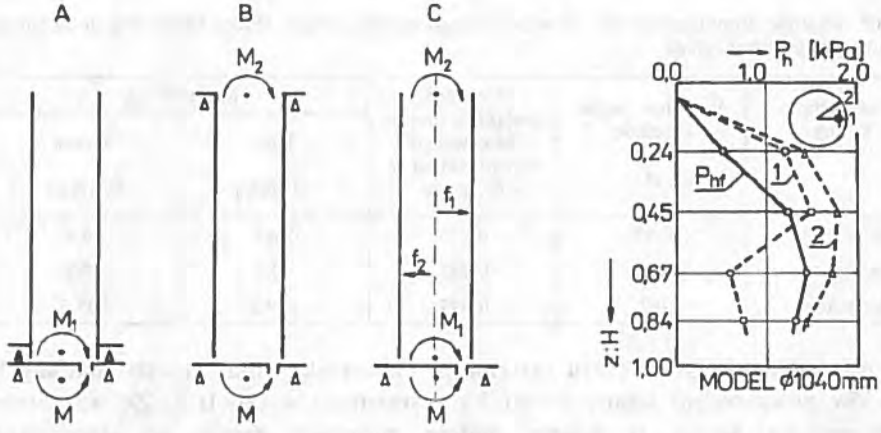
Stosunek wysokości do średnicy zbiornika H/D	Moment siły M [Nm]	Kąt przesunięcia fazowego α_0 [°]
4.04	342.6 ± 11.8	2.5 ± 1.0
3.84	892.4 ± 16.6	1.9 ± 1.1
3.64	885.0 ± 16.6	2.0 ± 1.1
3.35	875.1 ± 16.2	1.9 ± 1.2
3.04	886.0 ± 17.5	1.9 ± 1.1
2.73	859.7 ± 15.1	1.6 ± 1.0
2.42	852.2 ± 14.9	1.7 ± 1.1
2.12	845.1 ± 14.2	1.8 ± 1.0
1.79	832.3 ± 13.5	1.7 ± 1.0
1.50	816.0 ± 14.6	1.6 ± 1.0

przepływ rdzeniowy. Współczynniki determinacji R^2 aproksymacji kolejnych chwilowych rozkładów obciążenia głowic funkcją sinus były nie mniejsze niż 98%. Wartości momentu siły M oraz kąta przesunięcia fazowego α_0 odpowiadające kolejnym krzywym sinusoidalnego rozkładu dynamicznego obciążenia głowic podczas nieustalonego opróżniania zebrano w tabelach 3 i 4.

8.2. Wypadkowy moment siły

Obciążenie głowic podpierających dno zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania było zawsze istotnie mniejsze (α = 0.01) po stronie otworu wysypowego, zaś obciążenie głowic podpierających ścianę zbiornika było zawsze istotnie większe (α = 0.01) po stronie otworu wylotowego niż po stronie przeciwnej, niezależnie od miejsca zawieszenia ściany zbiornika na głowicach. Kąt przesunięcia fazowego α_0 był bliski zera dla obu punktów podparcia ściany. Oznacza to, że wypadkowy moment siły wywierany na ścianę zbiornika miał ten sam kierunek i zwrot dla obu punktów podparcia ściany. Rysunek 21 ilustruje zwrot momentu siły odpowiadający rozważanym przypadkom. Ten sam zwrot momentu siły względem punktu na osi zbiornika poniżej poziomu ziarna oraz względem punktu na osi zbiornika powyżej wysokości słupa ziarna w zbiorniku odzwierciedla główną tendencję rozkładu poziomego naporu wzdłuż obwodu ściany zbiornika podkreślaną często przez wielu badaczy: spadek naporu w dolnej strefie zbiornika oraz wzrost naporu w górnej strefie po stronie otworu wysypowego [48, 74, 82]. Typowy rozkład naporu poziomego po stronie otworu wysypowego oraz w przekroju bocznym uzyskany przez Kamińskiego [48] ilustruje rysunek 21. Omawianą sytuację ilustrują na tym rysunku dwie poziome równoległe siły o przeciwnych zwrotach f_1 i f_2 przyłożone do ściany na różnych poziomach wysokości, reprezentujące w uproszczony sposób wypadkowy udział w wyznaczonym momencie siły poziomego naporu na ścianę, nierównomiernego wzdłuż jej obwodu i wysokości.

Rysunek 22 przedstawia wartości średnie momentu siły wywieranego na dno i ścianę zbiornika w funkcji niecentryczności otworu wysypowego ER dla trzech badanych rodzajów ściany zbiornika mierzone podczas ustalonego przepływu przy wysokości słupa ziarna 2.44 m (H/D=4). W trakcie 30 minut ustalonego przepływu wartości wypadkowego momentu praktycznie nie ulegały zmianie podczas kolejnych powtórzeń eksperymentu, stąd też poziom istotności wpływu niecentryczności otworu wysypowego był dużo mniejszy niż 0.001, zaś 95 % przedziały ufności Tukey'a na rysunku 22 pokrywają się praktycznie z oznaczeniami punktów pomiarowych. Z trzech badanych rodzajów powierzchni ściany zbiornika największy moment siły uzyskano w przypadku gładkiej ściany, zaś najmniejszy w przypadku ściany pokrytej papierem ściernym. Wartości współczynnika tarcia, wartości średnie momentu siły oraz wartości stosunku obciążenia



Rys. 21. Ilustracja momentów siły działających na ścianę i dno zbiornika oraz rozkład poziomego naporu na ścianę podczas niecentrycznego opróżniania według Kamińskiego [48]

f_1, f_2 – poziome siły reprezentujące sumaryczny udział nierównomiernego naporu poziomego w wypadkowym momencie,

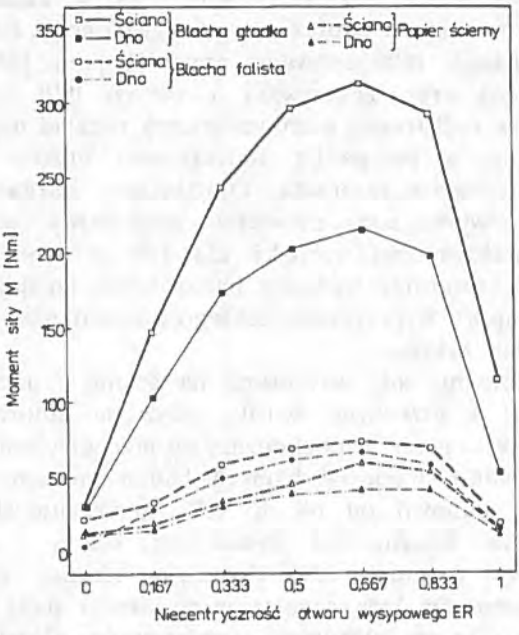
M – wypadkowy moment wywierany na dno zbiornika,

M_1, M_2 – wypadkowy moment wywierany na ścianę mierzony względem punktu na osi symetrii poniżej oraz powyżej słupa ziarna,

p_h – napór poziomy podczas niecentrycznego opróżniania,

p_{hf} – napór poziomy po napełnieniu zbiornika

z:H – stosunek głębokości mierzonej od górnej powierzchni materiału sypkiego do wysokości ściany zbiornika



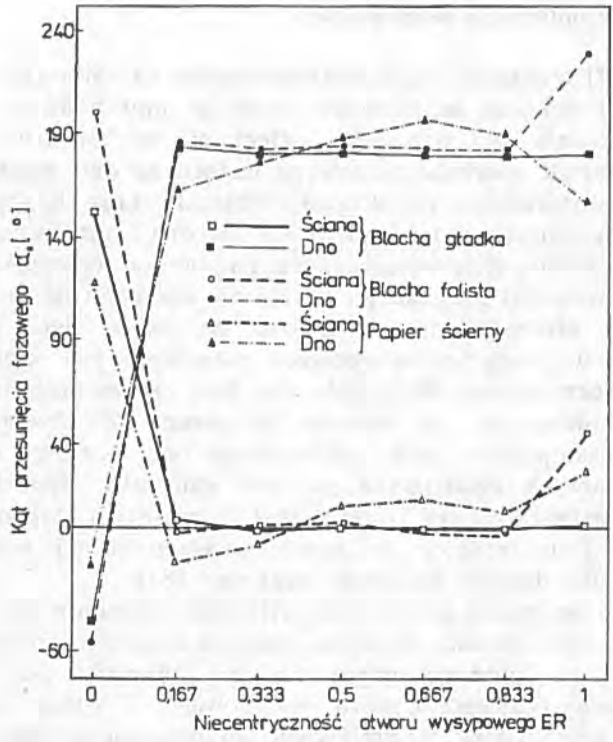
Rys. 22. Wartości średnie momentu siły w zależności od niecentryczności otworu wysypowego ER dla trzech badanych rodzajów ściany podczas ustalonego przepływu przy wysokości słupa ziarna 2.44 m (H/D=4)

Tabela 5. Wartości średnie momentu siły wywieranego na dno i ścianę zbiornika dla trzech badanych rodzajów powierzchni ściany

Powierzchnia ściany	Współcz. tarcia o ścianę μ	Stosunek obciążenia dna do całkowitego ciężaru ziarna w zbiorniku	Moment siły	
			Dno M [Nm]	Ściana M [Nm]
Papier ścierny	0.85	0.256	27.7	34.4
Blacha falista	0.5	0.257	40.0	47.9
Gładka blacha	0.2	0.647	139.2	205.3

dna do całkowitego ciężaru ziarna w zbiorniku dla trzech badanych rodzajów powierzchni ściany zbiornika zestawiono w tabeli 5. Ze wzrostem współczynnika tarcia o ścianę maleje pionowy napór na dno oraz poziomy napór na ścianę [48, 74]. Zatem wypadkowy moment siły, jako globalna miara asymetrii naporu, również maleje ze wzrostem współczynnika tarcia. Niecentryczność otworu wysypowego wpływa istotnie ($\alpha < 0.001$) na moment siły wywierany na ścianę i dno zbiornika w przypadku wszystkich trzech ścian zbiornika. Maximum momentu wywieranego na ścianę i dno zbiornika dla wszystkich trzech rodzajów powierzchni ściany występowało przy wartości współczynnika niecentryczności otworu wylotowego ER równej 0.667. Oznacza to, że ze zmianą współczynnika tarcia ulega zmianie przede wszystkim wartość naporu, zaś w znacznie mniejszym stopniu kształt jego rozkładu wzdłuż obwodu i wysokości ściany. Otrzymane zależności potwierdzają relacjonowane przez Piepera [74], Kamińskiego i Zubrzyckiego [46] oraz Thompsona i innych [99] wyniki badań, z których wynikało, że najbardziej nierównomierny rozkład naporu poziomego na ścianę występuje w przypadku umieszczenia otworu wysypowego w pobliżu połowy promienia zbiornika. Opróżnianie ziarna przez otwór w ścianie zbiornika wytwarzało niewielki wypadkowy moment siły w porównaniu do maksymalnej wartości dla ER = 0.667, co w świetle prezentowanych w literaturze wyników badań stwierdzających bardzo silną niejednorodność naporu w przypadku takiego opróżniania [47, 53] świadczy o ograniczonym jej zakresie.

Wypadkowe momenty siły wywierane na ścianę i dno powinny mieć zbliżone wartości i przeciwne zwroty, gdyż na zbiornik jako całość działa jedynie niewielki moment pochodzący od niecentrycznie wypływającego ośrodka. W przypadku przeprowadzonych badań moment siły wywierany na dno zbiornika stanowił od 68 do 83% momentu siły wywieranego na ścianę zbiornika, zależnie od powierzchni ściany i niecentryczności otworu wysypowego (rysunek 22). Przyczyną różnicy w wyznaczonych wartościach momentu siły była różnica w wysokości punktów zawieszenia dna i ściany zbiornika na głowicach pomiarowych. Głowice, na których zawieszona była ściana zbiornika umieszczone były o 18 cm wyżej niż głowice, na których zawieszone było dno.



Rys. 23. Wartości średnie kąta przesunięcia fazowego α_0 w zależności od niecentryczności otworu wysypowego ER dla trzech badanych rodzajów ściany zbiornika podczas ustalonego przepływu przy wysokości słupa ziarna 2.44 m (H/D=4)

Rysunek 23 przedstawia kąt przesunięcia fazowego α_0 momentu siły wywieranego na ścianę i dno zbiornika dla wszystkich badanych warunków opróżniania. Dla wartości niecentryczności otworu wysypowego ER w przedziale od 0.167 do 0.833 kąt przesunięcia fazowego był bliski 0° w przypadku ściany oraz 180° w przypadku dna. Dla tego zakresu niecentryczności otworu wysypowego moment siły wytworzony na skutek niecentrycznego opróżniania był wielokrotnie większy od momentu wytworzonego przez losową niejednorodność ośrodka oraz rozrzut wartości współczynnika tarcia o ścianę. W przypadku centrycznego opróżniania kąt przesunięcia fazowego podążał za kierunkiem wymuszonym przez losową nierównomierność rozkładu naporu. Wartość momentu siły dla przypadku centrycznego opróżniania była w każdym wariancie eksperymentu istotnie różna od zera, co wskazuje na istotny udział losowego rozkładu naporu w wypadkowym momencie siły. W przypadku niecentryczności otworu wysypowego równej 1, kąt przesunięcia fazowego wyraźnie odbiegał od spodziewanych wartości 0° oraz 180° w wyniku sumowania się wpływu niecentrycznego opróżniania oraz losowej nierównomierności naporu.

8.3. Metoda obliczania momentu siły

Schwab [87] wykonując serię eksperymentów na zbiorniku o naturalnej skali wielkości wykazał, że pionowy napór na dno podczas centrycznego opróżniania rośnie ze wzrostem odległości od otworu wysypowego. Analogiczny kształt rozkładu pionowego naporu na dno zbiornika podczas centrycznego opróżniania przedstawił Rybiański oraz Kramnik [85]. W przypadku niecentrycznego opróżniania można oczekiwać podobnego przebiegu zależności pionowego naporu na dno od odległości od otworu wysypowego. Rybiański [84] badając obciążenia den zbiorników opróżnianych centrycznie i niecentrycznie stwierdził, że udział leja opróżnianego niecentrycznie w przenoszeniu obciążeń pionowych jest większy niż leja opróżnianego centrycznie. Obciążenie dna było zawsze mniejsze po stronie otworu wylotowego niż po stronie przeciwnej. Z chwilą rozpoczęcia opróżniania następowało nagłe zmniejszenie się wartości sumarycznych obciążeń pionowych działających na dno zbiornika. Spadek obciążenia dna z chwilą rozpoczęcia opróżniania rósł ze wzrostem stosunku wysokości zbiornika do jego średnicy do pewnej asymptotycznej wartości charakterystycznej dla danego materiału sypkiego [83].

Podstawą proponowanego sposobu wyliczania momentu siły wywieranego przez ośrodek sypki na dno zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania jest założenie, że pionowy napór na dno zbiornika jest symetryczny względem niecentrycznego otworu wysypowego i rośnie ze wzrostem odległości od tego otworu. W niniejszym opracowaniu zależność pionowego naporu na dno σ_v od odległości od otworu wysypowego opisano funkcją potęgową:

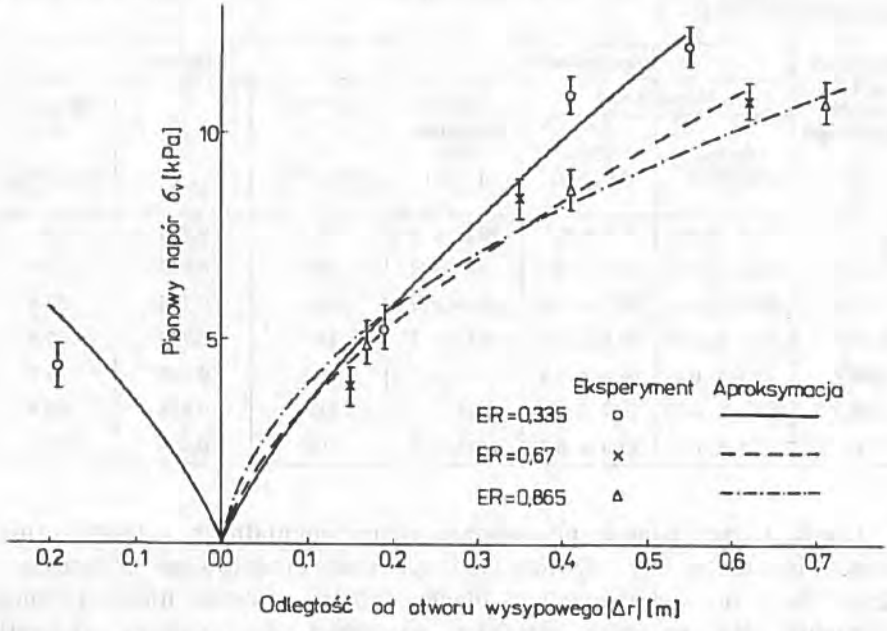
$$\sigma_v(r, \alpha) = A\Delta r^B \tag{25}$$

gdzie Δr jest odległością rozważanego punktu na dnie zbiornika (r, α) od osi otworu wysypowego (r_A, α_A):

$$|\Delta r(r,\alpha)| = \sqrt{r^2 + r_A^2 + 2rr_A \cos(\alpha - \alpha_A)} \tag{26}$$

zaś A i B są stałymi parametrami aproksymacji. Założenie o symetrii naporu na dno wokół otworu wysypowego będzie spełnione z pewnymi ograniczeniami, gdyż symetria ta będzie coraz silniej zakłócana przez różną odległość do ściany zbiornika w różnych kierunkach wokół otworu wysypowego w miarę wzrostu niecentryczności otworu. Przy ścianie panują inne warunki tarcia niż w głębi ośrodka sypkiego i stąd różna odległość do ściany w różnych kierunkach zakłóci założoną symetrię obciążenia. Istotnym problemem jest ustalenie do jakiego stopnia tarcie na ścianie, inne niż w głębi materiału, wpłynie na postulowany rozkład obciążenia. Badania rozkładu naporu pionowego na dno zbiornika o średnicy 0.91 m w przypadku niecentrycznego opróżniania wykazały, że wykładnik B

aproksymacji rozkładu naporu na dno funkcją potęgową malał ze wzrostem niecentryczności otworu wysypowego [39]. Praktycznie oznacza to, że ze wzrostem niecentryczności otworu napór pionowy $\sigma_v(r,\alpha)$ stabilizuje się przy mniejszej odległości od otworu wysypowego Δr. Przykłady otrzymanych rozkładów naporu przedstawiono na rysunku 24, a parametry aproksymacji zestawiono w tabeli 6. Rysunek 24 stanowi również dobrą ilustrację wpływu warunków ciernych na ścianie zbiornika na rozkład naporu na dno. W przypadku niecentryczności otworu równej 0.335 w odległości 0.19 m od otworu wysypowego pionowy napór na dno po stronie otworu bliższej ściany zbiornika był o około 16% mniejszy niż po stronie przeciwnej.



Rys. 24 Wartości średnie (wraz z 95% przedziałami ufności Tukey'a) pionowego naporu na dno oraz aproksymacja rozkładu naporu funkcją potęgową dla trzech lokalizacji otworu wysypowego [39]

Otrzymane z aproksymacji parametry A i B rozkładu pionowego naporu na dno zastosowano do obliczenia wypadkowego momentu siły zgodnie z następującym równaniem:

$$M = \int_0^{r_o}\int_0^{2\pi} \sigma_v(r,\alpha)\, r^2 \cos\alpha \, dr\, d\alpha \tag{27}$$

Parametr A przyjętego rozkładu naporu σ_v wyznaczono porównując wartość eksperymentalną całkowitego pionowego obciążenia dna z obciążeniem wyliczonym w oparciu o przyjęty kształt rozkładu naporu:

$$F_z = \int_0^{r_o}\int_0^{2\pi} \sigma_v(r,\alpha)\, r\, dr\, d\alpha \tag{28}$$

zaś wykładnik B aproksymowano w oparciu o następujące równanie regresji:

$$B = 0.9145 - 0.4281ER \tag{29}$$

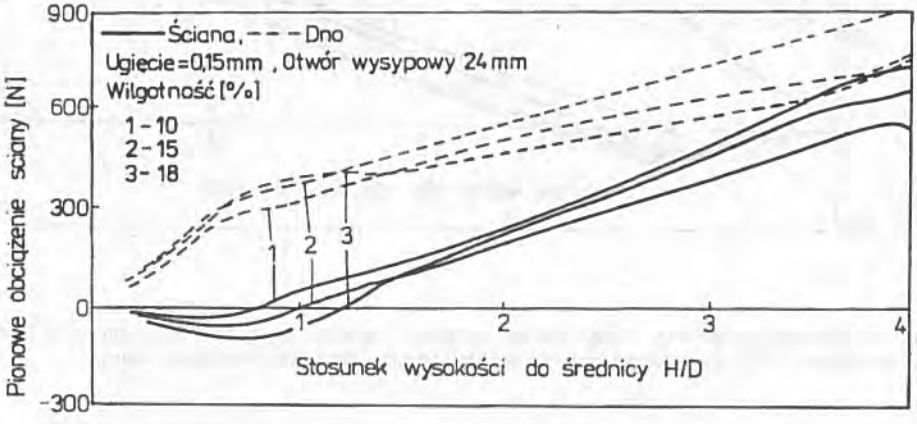
Tabela 6. Porównanie eksperymentalnych (średnie wraz z ich błędami standardowymi) i teoretycznych wartości momentu siły wywieranego na dno modelowego zbiornika o średnicy 0.61 m wykonanego z blachy falistej podczas niecentrycznego opróżniania dla wartości stosunku wysokości do średnicy zbiornika H/D = 4

Niecentryczność otworu wysypowego ER	Eksperyment			Model		
	Moment siły		Całkowite obciążenie dna F_z [N]	$A * 10^3$ [Nm^{-B-2}]	B	Moment siły M [Nm]
	Ściana M [Nm]	Dno M [Nm]				
0	21.5 ± 0.2	4.7 ± 0.1	1321 ± 7	19.5	0.914	0
0.167	32.7 ± 0.2	27.7 ± 0.1	1445 ± 7	18.7	0.843	31.8
0.333	58.7 ± 0.2	48.7 ± 0.1	1469 ± 7	16.4	0.772	53.6
0.500	69.1 ± 0.2	60.6 ± 0.1	1547 ± 7	14.7	0.700	67.9
0.667	72.7 ± 0.2	66.6 ± 0.1	1627 ± 7	13.1	0.629	73.2
0.833	68.6 ± 0.2	56.7 ± 0.1	1665 ± 7	11.4	0.558	68.8
1	12.1 ± 0.2	15.0 ± 0.3	1673 ± 7	9.8	0.486	57.4

Tabela 6 przedstawia porównanie eksperymentalnych i teoretycznych wartości momentu siły wywieranego na dno modelowego zbiornika o średnicy 0.61 m, wykonanego z blachy falistej podczas niecentrycznego opróżniania dla wartości stosunku wysokości do średnicy zbiornika H/D = 4. Dla niecentryczności otworu wysypowego w zakresie od 0.167 do 0.833 moment siły wyliczony zgodnie z zaproponowaną metodą był o około 10-15% większy od wartości doświadczalnych. Biorąc pod uwagę przyjęte uproszczenia jest to dostateczne odzwierciedlenie wyników doświadczalnych. Jedynie w przypadku opróżniania przez otwór wysypowy w ścianie (ER = 1) wyliczona wartość momentu siły była dużo większa od wyznaczonego doświadczalnie. W przypadku takiego opróżniania warunki tarcia na ścianie zbiornika bardzo silnie modyfikują rozkład naporu wokół otworu wysypowego. Ponieważ przedstawiony model zakłada symetrię obciążenia wokół otworu wysypowego, zatem wyliczony moment siły w przypadku opróżniania przez otwór w ścianie (ER=1) jest dużo większy od rzeczywistego ze względu na pominięcie wpływu tarcia na ścianie na asymetrię pionowego naporu na dno.

9. WPŁYW SPRĘŻYSTOŚCI ZIARNA NA OBCIĄŻENIE ŚCIANY ZBIORNIKA

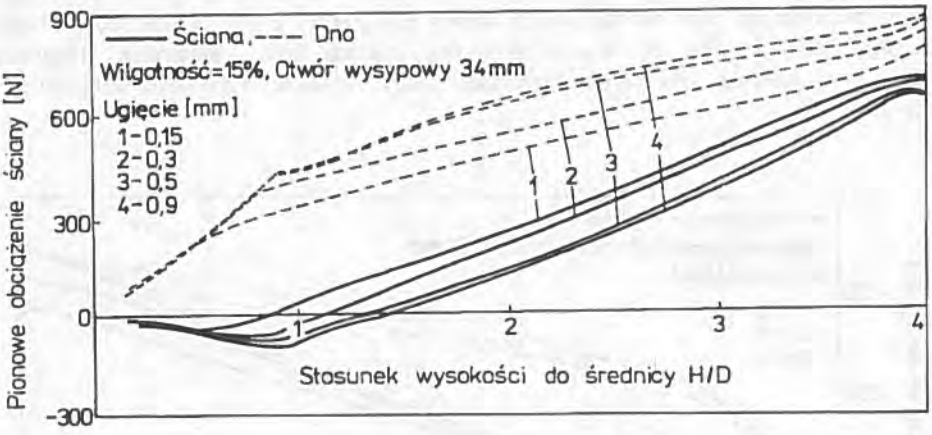
W końcowym stadium opróżniania, gdy stosunek wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) malał poniżej 1, całkowita siła tarcia o gładką ścianę była zawsze skierowana do góry, w przeciwieństwie do normalnie skierowanej w dół. Rysunek 25 przedstawia zależność, pionowego obciążenia ściany i dna od stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) podczas opróżniania ziarna pszenicy o trzech różnych poziomach wilgotności. Podczas każdego eksperymentu obserwowano zmianę znaku siły tarcia, gdy stosunek wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) zbliżał się do jedności. Ze wzrostem wilgotności ziarna rosło maksimum siły tarcia, skierowanej ku górze, z 40 N dla wilgotności ziarna 10% do 96 N dla wilgotności ziarna 18%. Również stosunek H/D, przy którym siła tarcia zmieniała znak, rósł ze wzrostem wilgotności ziarna.



Rys. 25. Zależność pionowego obciążenia ściany i dna od stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) podczas opróżniania ziarna pszenicy o trzech poziomach wilgotności

Charakterystyczny lej na swobodnej powierzchni ziarna, świadczący o zakończeniu fazy przepływu masowego i rozpoczęciu fazy przepływu rdzeniowego, pojawiał się przy wartości stosunku H/D malejącej poniżej 1.1 dla ziarna o wilgotności 10% oraz przy wartości stosunku H/D malejącej poniżej 2.5 dla ziarna o wilgotności 18%. Wysokość martwej strefy ziarna pozostającej w zbiorniku po zakończeniu opróżniania wynosiła 80 mm dla ziarna o wilgotności 10% oraz 150 mm dla ziarna o wilgotności 18%.

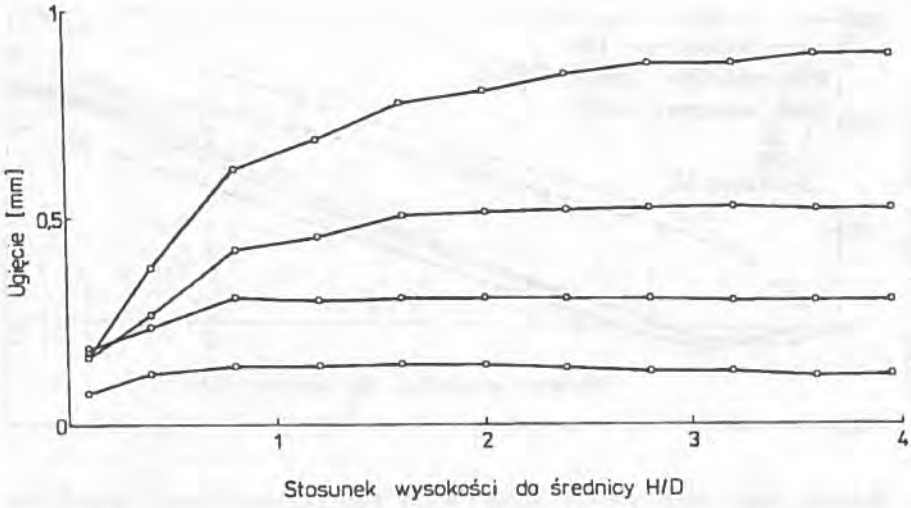
Podobnie jak wilgotność ziarna, również wielkość ugięcia dna zbiornika względem jego ściany wpływała istotnie na zmianę znaku siły tarcia. Rysunek 26 przedstawia zależność pionowego obciążenia ściany i dna od stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) dla czterech wartości maksymalnego ugięcia dna względem ściany. Ze wzrostem ugięcia dna rosło maksimum skierowanej ku górze siły tarcia. Dla ugięcia dna równego 0.5 mm zmiana znaku siły tarcia pojawiała się dokładnie w chwili powstawania leja na swobodnej powierzchni ziarna. Zwiększenie ugięcia dna z wartości 0.5 do 0.9 mm nie powodowało dalszego istotnego wzrostu wartości siły tarcia skierowanej ku górze.



Rys. 26. Zależność pionowego obciążenia ściany i dna od stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) dla czterech wartości maksymalnego ugięcia dna względem ściany

Rysunek 27 przedstawia wartości ugięcia dna względem ściany w funkcji stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika dla czterech rozważanych przypadków maksymalnego ugięcia. Wielkość względnego ugięcia dna pozostawała stała przez pierwsze 30 do 80% czasu procesu opróżniania zależnie od wartości maksymalnego ugięcia dna dla napełnionego ziarnem zbiornika.

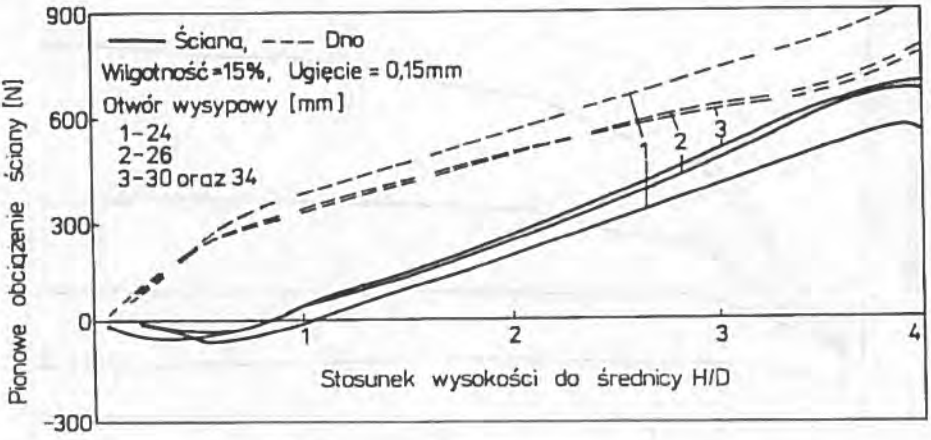
Rysunek 28 przedstawia obciążenie ściany i dna dla czterech różnych prędkości przepływu ziarna (czterech różnych średnic otworu wysypowego). Zwiększenie średnicy otworu wysypowego z 24 do 30 mm powodujące wzrost prędkości przepływu ziarna względem ściany zbiornika z 1.8 do 4.8 m/h istotnie zmieniło przebieg krzywych obciążenia ściany i dna w funkcji stosunku H/D, natomiast nieznacznie zmniejszyło wielkość maksymalnej siły tarcia skierowanej ku górze. Nie zaobserwowano żadnej



Rys. 27. Ugięcie dna zbiornika względem ściany w funkcji stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D)

różnicy w rozkładzie obciążenia przy zmianie średnicy otworu wysypowego z 30 do 34 mm. Wysokość martwej strefy pozostającej w zbiorniku po zakończeniu procesu opróżniania zmalała ze 110 do 80 mm przy wzroście średnicy otworu wysypowego z 24 do 34 mm. Ponad trzykrotne skrócenie czasu opróżniania powodowało zauważalne zmniejszenie lepko-sprężystej reakcji ziarna na zanik obciążenia w trakcie opróżniania, czego rezultatem jest różnica w przebiegu krzywych 1 i 3 na rysunku 28. Obserwację tę potwierdzają wyniki badań Grundasa i Horabika [20] wykazujące, że w przypadku suchego ziarna pszenicy około 65% całkowitej zmiany objętościowego odkształcenia próbki ziarna w procesie pełzania zachodziło natychmiast po przyłożeniu obciążenia, zaś następne 20% odkształcenia zachodziło w ciągu pierwszych 30 sekund obciążenia próbki. W przypadku większej wilgotności ziarna (18%, 24%) udział lepko-sprężystej deformacji ośrodka wzrastał do 48% całkowitej deformacji objętościowej. Zwiększenie czasu magazynowania ziarna w zbiorniku z 30 minut do 18 godzin, a nawet do 7 dni nie zmieniło istotnie rozkładu obciążenia.

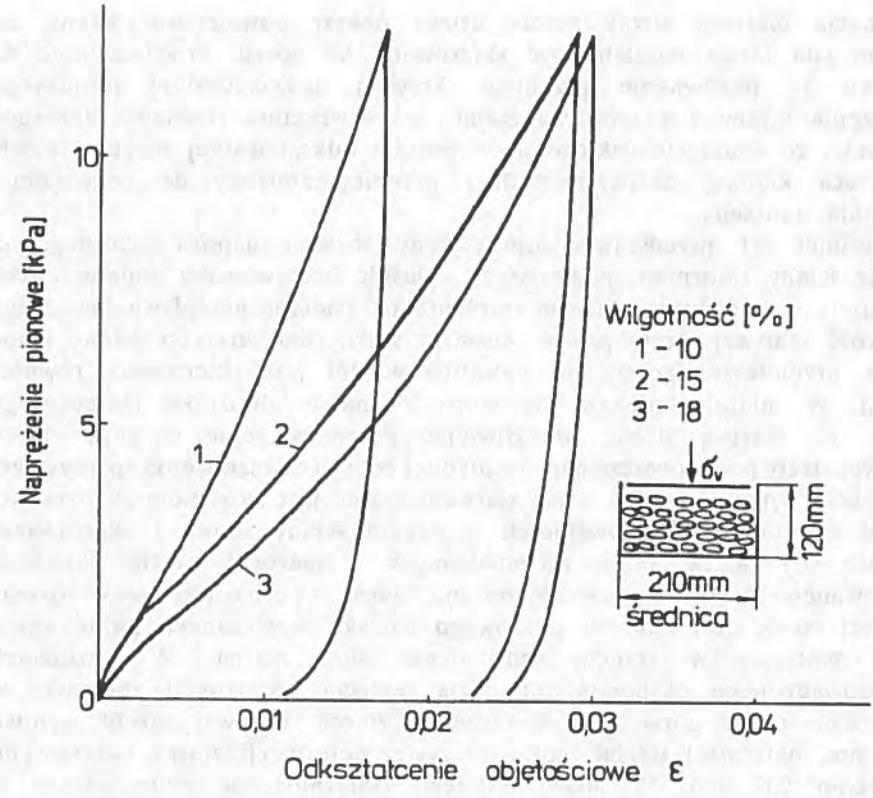
Podobne zjawisko zmiany znaku siły tarcia o ścianę obserwował Kamiński [48] badając wpływ podatności podparcia ściany i dna na rozkład obciążenia w zbiorniku. Zwiększenie podatności dna zmniejszało wartość działającego na nie obciążenia, natomiast zwiększało wartości siły tarcia o ścianę. Wzrost podatności ściany wywoływał wzrost obciążenia dna i jednocześnie prowadził do spadku wartości wypadkowej siły tarcia o ścianę lub nawet do zmiany jej znaku. W przypadku ziarna pszenicy przemieszczenie ściany rzędu 1.5-2 mm powodowało stabilizację nowych wartości globalnych obciażeń ściany i dna. W badaniach Kamińskiego



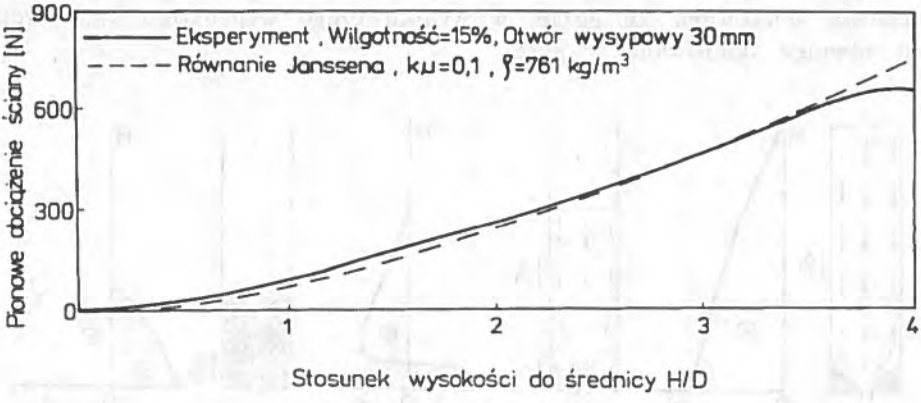
Rys. 28. Zależność pionowego obciążenia ściany i dna od stosunku wysokości słupa ziarna do średnicy zbiornika (H/D) podczas opróżniania dla czterech wymiarów otworu wysypowego

[48] przyczyną zmiany znaku siły tarcia o ścianę w dolnej strefie zbiornika było przemieszczenie ściany wymuszone jej ciężarem oraz skierowanym w dół naporem stycznym górnych warstw ziarna. Natomiast w przypadku wyników badań omawianych w tym rozdziale przyczyny zmiany znaku siły tarcia o ścianę należy upatrywać w histerezie sprężysto-plastycznej ziarna zgromadzonego w martwej strefie. W trakcie opróżniania maleje nacisk słupa ziarna na martwą strefę. Malejący nacisk uwalnia część energii odkształcenia sprężystego ziarna. Skutkiem tego jest przemieszczenie w górę ziarna w martwej strefie, a więc zmiana znaku siły tarcia o ścianę. Efekt ten jest dodatkowo wzmacniany, jeśli ugięcie konstrukcji dna pod wpływem ciężaru ziarna jest większe od ugięcia ściany. Testy edometrycznego obciążania próbek ziarna przeprowadzone jako badania uzupełniające wykazały, że lepko-sprężysta część odkształcenia warstwy ziarna pszenicy znikająca po usunięciu obciążenia równego naciskowi słupa ziarna na martwą strefę wynosiła około 0.006. Tej wartości odwracalnego odkształcenia odpowiada skierowane ku górze przemieszczenie martwej strefy o wysokości 100 mm równe 0.6 mm. Zależności naprężenie-odkształcenie uzyskane w testach edometrycznego obciążania i odciążania warstwy ziarna ilustruje rysunek 29.

Pomiary przeprowadzone na zbiorniku wyposażonym w stożkowe dno wyjaśniają rolę martwej strefy w zmianie znaku siły tarcia ziarna o ścianę. Kąt nachylenia dna względem poziomego kierunku równy 60° uniemożliwiał powstawanie martwej strefy. Rysunek 30 ilustruje przebieg zależności pionowego obciążenia ściany od stosunku H/D podczas opróżniania zbiornika. Przez cały czas opróżniania pionowa siła tarcia ziarna o ścianę zbiornika skierowana była w dół. Oznacza to, że



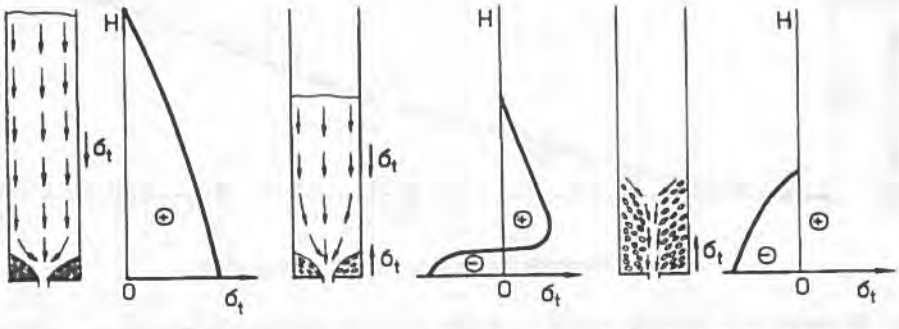
Rys. 29. Zależność naprężenie-odkształcenie w teście edometrycznego obciążania-odciążania ziarna pszenicy o trzech poziomach wilgotności



Rys. 30. Porównanie pionowego obciążenia ściany zbiornika wyposażonego w stożkowe dno z rozwiązaniem równania Janssena

eliminacja martwej strefy ziarna usuwa obszar powierzchni ściany, na którym siła tarcia mogłaby być skierowana ku górze. Przedstawione na rysunku 30 porównanie przebiegu krzywej doświadczalnej pionowego obciążenia ściany z krzywą wynikającą z rozwiązania równania Janssena wskazuje, że usunięcie zakłócenia w postaci odkształcalnej martwej strefy przywraca krzywej eksperymentalnej przebieg zbliżony do rozwiązania równania Janssena.

Rysunek 31 przedstawia hipotetyczny rozkład naporu stycznego σ_t wzdłuż ściany zbiornika, pozwalający wyjaśnić obserwowaną zmianę znaku siły tarcia w końcowym stadium opróżniania. Podczas przepływu masowego wysokość martwej strefy jest w zasadzie stała. Siła tarcia o ścianę słupa ziarna przemieszczającego się pionowo w dół jest skierowana również w dół. W miarę obniżania się słupa ziarna w zbiorniku maleje jego nacisk na martwą strefę, umożliwiając przemieszczenie w górę ziaren martwej strefy pod wpływem nagromadzonej energii odkształcenia sprężystego. W efekcie wypadkowa siła tarcia ziarna o ścianę jest złożeniem skierowanej w dół siły tarcia przepływających względem ściany ziaren i skierowanej w górę siły tarcia ziaren zgromadzonych w martwej strefie. Wielkość skierowanego ku górze przemieszczenia ziarna zależna jest od wysokości martwej strefy oraz zakresu pionowego nacisku wywieranego na tę strefę przez malejący w trakcie opróżniania słup ziarna. W warunkach przeprowadzonego eksperymentu udział ugięcia konstrukcji zbiornika w skierowanym ku górze przemieszczeniu ziaren martwej strefy wynosił 0.15 mm, natomiast udział lepko-sprężystej deformacji ziarna oszacowano na około 0.6 mm. W miarę dalszego obniżania się słupa ziarna w zbiorniku rośnie wysokość martwej strefy. W momencie pojawienia się przepływu rdzeniowego jej wysokość równa jest praktycznie wysokości słupa ziarna. Nagły wzrost wysokości martwej strefy oraz redukcja wysokości warstwy ziarna przemieszczającego się pionowo w dół względem ściany powoduje, że w wypadkowej sile tarcia ziarna o ścianę przeważa składowa skierowana ku górze, w wyniku czego wypadkowa siła tarcia jest również skierowana w górę.



Rys. 31. Ilustracja rozkładów naporu stycznego dla różnych wysokości słupa ziarna w zbiorniku

10. DYSKUSJA

Problemy dotyczące magazynowania ośrodków granularnych stały się w ostatnich latach przedmiotem zainteresowania kilku dziedzin nauki i techniki: mechaniki teoretycznej, inżynierii budowlanej, inżynierii rolniczej, technologii chemicznej. Każda z tych dziedzin koncentruje się na nieco innych zagadnieniach mechaniki ośrodków sypkich. Podejście mechaniki teoretycznej skupia się głównie na poszukiwaniu wyjaśnienia podstawowych mechanizmów przenoszenia naprężeń w ośrodku sypkim i sposobów ich opisu. Inżynieria budowlana opracowuje zaś coraz nowsze metody projektowania bezpiecznych i funkcjonalych konstrukcji zbiorników w oparciu o uproszczone, lecz wielokrotnie sprawdzone i powszechnie akceptowane schematy rozkładu naporu oraz proste prawa materiałowe ośrodka [17, 20]. Inne szczegółowe dyscypliny (inżynieria rolnicza, agrofizyka, technologia chemiczna) dostarczają niezbędnych informacji o podstawowych właściwościach fizycznych materiałów granularnych specyficznych dla danej dziedziny [50, 66, 106]. Informacje te są istotne zarówno w badaniach podstawowych mechaniki teoretycznej jak również w opracowywaniu praktycznych rozwiązań problemów napotykanych w aktualnie stosowanych technologiach magazynowania i transportu materiałów granularnych.

Trzy podstawowe parametry ośrodka granularnego: współczynnik tarcia o ścianę μ, stała Janssena k oraz gęstość ośrodka ρ występujące w równaniu Janssena jako stałe materiałowe są funkcjami innych właściwości fizycznych ośrodka, których zmienność jest często trudna do przewidzenia. Propozycja Rossa i innych [80], aby uwzględnić w równaniu Janssena wpływ wilgotności ziarna oraz pionowego naprężenia na trzy wymienione parametry równania stanowi istotny krok w kierunku bliższego poznania mechanizmów decydujących o zachowaniu się ziarna w zbiorniku. Niniejsza praca podejmuje próbę wyjaśnienia kolejnych specyficznych, bądź szczególnie wyraźnie widocznych w przypadku ziarna zbóż, zagadnień dotyczących magazynowania ośrodków granularnych.

Znaczne rozrzuty wartości naporu ośrodka relacjonowane przez wielu badaczy [5, 7, 17, 66, 69] związane są bardzo często z losowym powstawaniem nieregularnej struktury materiału granularnego w zbiorniku w trakcie napełniania i wpływem powstałej struktury na właściwości ośrodka. W przypadku pomiaru całkowitego obciążenia ściany i dna losowy charakter obserwowanych zjawisk wpływa na rozrzut wartości i kierunku wypadkowego momentu, co jest najwyraźniej widoczne w przypadku centrycznego napełniania i opróżniania, kiedy jedynym źródłem asymetrii obciążenia pozostaje losowa struktura ośrodka oraz rozrzut wartości współczynnika tarcia o ścianę. Natomiast całkowite obciążenie ściany lub dna uśrednia lokalne fluktuacje naporu i jest znacznie mniej

wrażliwe na losowy charakter powstałej struktury ośrodka niż mierzony lokalnie napór ośrodka.

Wypływające ze zbiornika ziarno pozostawia na powierzchni ściany kutynę, która pokrywając nierówności powierzchni zmniejsza istotnie współczynnik tarcia. Szczególnie duże zmiany rozkładu obciążenia w zbiorniku zachodzą podczas kilku pierwszych przepływów ziarna względem nowej powierzchni ściany. Początkowy stan powierzchni ściany istotny jest tylko podczas pierwszych kilku przepływów ziarna. Stan stabilnej równowagi ustala się po przebyciu pewnej drogi poślizgu, a dokładniej po osadzeniu się równowagowej dla danego ziarna warstwy kutyny.

Sposób napełniania zbiornika zmienia zarówno gęstość ośrodka jak i przestrzenną orientację ziaren. Gęstość jest istotnie większa w przypadku napełniania zbiornika strumieniem rozproszonym. Wykazali to już wcześniej Kamiński [48], Moysey [65] oraz Williams i inni [102]. Wzrost gęstości ośrodka wpływa na rozkład obciążenia konstrukcji zbiornika w sposób bardziej złożony niż to przewiduje równanie Janssena. Większa gęstość ośrodka, a tym samym mocniejsze kontakty między poszczególnymi ziarnami powodują, że w statyce dno zbiornika przenosi więcej obciążenia niż w przypadku luźno usypanego ziarna. W pierwszych sekundach wypływu gęsto upakowanego ziarna ze zbiornika o gładkiej ścianie skok dynamicznego obciążenia ściany odbywał się w dwóch etapach: – natychmiast po otwarciu wylotu i – po czasie od 1 do 3 minut. Gęstość ośrodka wytworzona poprzez napełnianie strumieniem rozproszonym jest większa od gęstości odpowiadającej fazie opróżniania. W początkowym stadium opróżniania musi więc upłynąć pewien czas na wykonanie pracy niezbędnej do rozluźnienia struktury ośrodka. Rozluźnienie struktury ośrodka zachodzi w trakcie wzajemnego przemieszczania się ziaren oraz przemieszczania się ziaren względem ściany zbiornika. Przeprowadzone badania wykazały, że czas po jakim pojawiał się drugi skok dynamicznego obciążenia ściany zbiornika rósł w miarę zmniejszania się współczynnika tarcia ziarna o ścianę zbiornika. Wskazuje to na wpływ wartości siły tarcia na ścianie na szybkość rozluźniania struktury ośrodka. W pierwszych chwilach opróżniania zachodzi także redystrybucja stanu naprężenia: z czynnego – odpowiadającego fazie magazynowania, do biernego – odpowiadającego fazie opróżniania. Kierunek większego naprężenia głównego w czynnym stanie naprężenia jest tym bardziej zbliżony do pionowego im mniejszy jest współczynnik tarcia o ścianę zbiornika. W biernym stanie naprężenia kierunek większego naprężenia głównego jest tym bardziej zbliżony do poziomego im mniejszy jest współczynnik tarcia o ścianę zbiornika. A zatem im mniejszy jest współczynnik tarcia o ścianę zbiornika tym większa zmiana pola naprężenia musi zajść w pierwszych chwilach opróżniania. W pewnym momencie, gdy struktura ośrodka zostanie wystarczająco osłabiona, następuje lawinowe zniszczenie dotychczasowej struktury gęstego upakowania. W efekcie część obciążenia spoczywającego dotychczas na dnie zbiornika gwałtownie przenosi się na

ścianę, tworząc drugi nagły wzrost dynamicznego obciążenia ściany. Skok obciążenia ściany pojawiający się bezpośrednio po rozpoczęciu opróżniania przypisywany jest zmianie stanu naprężenia z czynnego w bierny, zaś drugi pojawia się w momencie zniszczenia struktury gęstego upakowania.

Niecentryczne napełnianie, bądź napełnianie strumieniem skierowanym ukośnie względem osi symetrii zbiornika wymusza pewną uprzywilejowaną orientację ziarna [32, 65, 71]. Wyróżniona orientacja ziarna w zbiorniku zmienia istotnie rozkład obciążenia wzdłuż obwodu ściany. W przypadku ziarna zbóż zjawisko to jest szczególnie wyraźnie widoczne ze względu na geometryczne podobieństwo ziaren oraz ich elipsoidalny kształt. Jeśli w zgromadzonym w zbiorniku ziarnie przeważa pewien wyróżniony kierunek orientacji najdłuższych osi ziaren, to w kierunku tym kąt tarcia wewnętrznego ośrodka jest najmniejszy, zaś w kierunku prostopadłym największy. Różna wartość kąta tarcia wewnętrznego ośrodka w różnych kierunkach powoduje, że napór ziarna na ścianę zbiornika nie jest stały wzdłuż obwodu ściany, lecz zmienia się zależnie od wartości kąta tarcia wewnętrznego w danym kierunku. Zaproponowana w niniejszej pracy metoda uwzględniania anizotropii kąta tarcia wewnętrznego ośrodka w równaniu Janssena pozwala przewidzieć wartość asymetrii obciążenia ściany zbiornika wywołanej wyróżnieniem pewnego kierunku orientacji ziarna.

Przeprowadzone pomiary pionowego obciążenia ściany i dna zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania w pełni potwierdzają wcześniejsze doniesienia wielu badaczy, że rozkład poziomego naporu wzdłuż obwodu ściany zależy od odległości od dna. Wielu badaczy obserwowało po stronie otworu wysypowego spadek poziomego naporu w dolnej strefie zbiornika oraz znaczny wzrost naporu w środkowej strefie [45, 46, 52, 70, 74]. Ten sam zwrot wypadkowego momentu siły wywieranego przez ziarno na ścianę zbiornika mierzonego względem punktu na osi symetrii zbiornika poniżej oraz powyżej słupa ziarna odzierciedla opisaną tendencję rozkładu naporu poziomego. Wypadkowy moment siły wywierany przez ziarno na ścianę zbiornika jest globalną miarą asymetrii poziomego naporu wzdłuż obwodu ściany. Maximum momentu siły uzyskiwane dla tej samej wartości niecentryczności otworu wylotowego ER równej 0.667 niezależnie od współczynnika tarcia ziarna o ścianę wskazuje, że kształt rozkładu naporu na ścianę i dno zbiornika jest niezależny od warunków ciernych ściany. Jedynie wartość naporu zależy od współczynnika tarcia. Moment siły wywierany na ścianę i dno podczas niecentrycznego opróżniania był największy w przypadku gładkiej ściany zbiornika, czyli gdy napór ziarna na dno był największy. Moment siły malał ze wzrostem współczynnika tarcia ziarna o ścianę, a więc w miarę zmniejszania się pionowego naporu na dno oraz poziomego naporu na ścianę. Rozkład naporu na ścianę podczas niecentrycznego opróżniania wynika z asymetrii obszarów: martwej strefy, przepływu radialnego (zbieżnego) oraz przepływu masowego bądź rdzeniowego zależnie od geometrii zbiornika. Największe

zmiany naporu na ścianę zachodzą w tych obszarach, gdzie granica ruchu i spoczynku ośrodka, bądź granica dwóch różnych rodzajów przepływu dochodzi bezpośrednio do ściany. Rozkład pionowego naporu na płaskie dno jest dużo prostszy, ponieważ stan naprężenia w ośrodku przekazywany jest na dno za pośrednictwem jednego tylko obszaru – martwej strefy. Przybliżoną wartość wypadkowego momentu wyliczyć można przyjmując bardzo proste założenie o symetrycznym wokół niecentrycznego otworu wysypowego rozkładzie naporu na dno. W ten sposób znając jedynie niecentryczność otworu wysypowego oraz całkowite obciążenie dna oszacować można wartość wypadkowego momentu siły wywieranego przez ziarno na dno i ścianę zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania.

Sprężyste ugięcie podparcia ściany i dna zbiornika zmienia istotnie rozkład obciążenia w zbiorniku [48]. Podobne zmiany obciążenia podczas fazy opróżniania wywołuje sprężystość ziarna. Obszarem szczególnie dużej kumulacji energii odkształcenia sprężystego ziarna jest martwa strefa nad płaskim dnem zbiornika. Malejący nacisk słupa wypływającego ośrodka uwalnia energię sprężystego odkształcenia ziarna. Efektem tego jest skierowane ku górze przemieszczenie ziarna w martwej strefie. Wypadkowa siła tarcia o ścianę jest wtedy kombinacją skierowanej w dół siły tarcia ziarna przepływającego względem ściany oraz skierowanej ku górze siły tarcia ziarna zgromadzonego w martwej strefie. Udział siły tarcia skierowanej ku górze może być na tyle duży, że powoduje zmianę zwrotu całkowitej siły stycznej wywieranej na ścianę zbiornika. Wilgotność zmienia w istotny sposób właściwości sprężyste i powierzchniowe ziarna, a tym samym wartość skierowanego ku górze przemieszczenia w martwej strefie, co znajduje odzwierciedlenie w wypadkowej sile tarcia o ścianę.

Przedstawione w tej pracy przykłady zachowania się pszenicy w modelowym zbiorniku nie wyczerpują problemu magazynowania ziarna zbóż w silosach, a jedynie zwracają uwagę na charakterystyczne efekty wywołane odkształcalnością ziaren oraz specyficzną strukturą ośrodka powstającą w pewnych warunkach napełniania. Zaobserwowanych na przykładzie ziarna pszenicy prawidłowości w rozkładzie obciążenia nie można uogólniać na inne zboża, choć często rozważane zależności są jakościowo podobne. Dokładne wyjaśnienie mechanizmów przenoszenia naprężeń w ośrodku sypkim oraz wzajemnego oddziaływania ośrodek – konstrukcja zbiornika jest bardzo trudne i będzie wymagać przeprowadzenia wielu badań. Sam opis struktury ośrodka powstającej w trakcie napełniania zbiornika jest już dość poważnym problemem. Brak niekwestionowanego równania konstytutywnego ośrodka sypkiego utrudnia dodatkowo sformułowanie teoretycznego opisu zachowania się ośrodka w zbiorniku. Dalsze badania w tym zakresie powinny w większym stopniu uwzględniać specyficzne właściwości poszczególnych ośrodków, co pozwoliłoby przybliżyć proponowane opisy teoretyczne oraz schematy rozkładu naporu do warunków rzeczywistych.

11. WNIOSKI

1. Kutyna osadzająca się na powierzchni ściany zbiornika w trakcie przepływu ziarna zmniejsza istotnie współczynnik tarcia. Szczególnie duże zmiany współczynnika tarcia o gładką ścianę zachodzą podczas pierwszych kilku przepływów ziarna.

2. Rozkład statycznego oraz dynamicznego obciążenia ściany i dna zależy od sposobu napełniania zbiornika. Napełnianie strumieniem rozproszonym wytwarza mniejsze statyczne obciążenie gładkiej ściany w porównaniu do napełniania centrycznego. W przypadku blachy falistej oraz chropowatej ściany strumień rozproszony powoduje większe statyczne obciążenie ściany w porównaniu do napełniania centrycznego. Mniejszemu statycznemu obciążeniu ściany towarzyszy na ogół większa wartość stosunku dynamicznego do statycznego obciążenia ściany.

3. W przypadku zbiornika o gładkiej ścianie, napełnianego strumieniem rozproszonym, skok dynamicznego obciążenia ściany w początkowym stadium opróżniania odbywał się w dwóch etapach: w chwili otwarcia wylotu oraz po czasie od 1 do 3 minut. Pierwszy skok obciążenia ściany związany jest ze zmianą stanu naprężenia z czynnego do biernego. Drugi pojawia się w momencie zniszczenia struktury gęstego upakowania wytworzonej w trakcie napełniania.

4. Niecentryczne napełnianie, bądź napełnianie strumieniem skierowanym ukośnie względem osi symetrii zbiornika wymusza pewną uprzywilejowaną orientację ziarna zmieniającą istotnie rozkład poziomego naporu wzdłuż obwodu ściany zbiornika.

5. Uwzględnienie anizotropii kąta tarcia wewnętrznego ośrodka w równaniu Janssena pozwala przewidzieć wartość asymetrii obciążenia ściany zbiornika wywołanej wyróżnieniem pewnego kierunku orientacji ziarna.

6. Wypadkowy moment siły wyliczony z pionowego obciążenia trzech głowic podpierających ścianę zbiornika odzwierciedla główne prawidłowości nierównomiernego rozkładu poziomego naporu wzdłuż obwodu ściany podczas niecentrycznego opróżniania: spadek poziomego naporu na ścianę po stronie otworu wysypowego w dolnej strefie zbiornika oraz wzrost naporu w górnej strefie.

7. Moment siły wywierany przez ziarno na ścianę i dno zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania maleje ze wzrostem współczynnika tarcia o ścianę.

8. Moment siły wywierany przez ziarno na ścianę i dno zbiornika podczas niecentrycznego opróżniania zależy istotnie od niecentryczności otworu wysypowego. Maximum momentu obserwowano dla niecentryczności otworu wysypowego ER równej 0.667 dla wszystkich badanych rodzajów powierzchni ściany zbiornika.

9. Do oszacowania wartości wypadkowego momentu siły wywieranego przez ośrodek sypki na ścianę i dno podczas niecentrycznego opróżniania wystarczające jest przyjęcie symetrycznego względem otworu wysypowego rozkładu pionowego naporu na dno. Kształt rozkładu naporu w funkcji odległości od otworu wysypowego dobrze przybliża funkcja potęgowa, której wykładnik maleje ze wzrostem niecentryczności otworu wysypowego.

10. Sprężystość ziarna zmienia istotnie rozkład pionowego obciążenia ściany i dna podczas opróżniania zbiornika z płaskim dnem. Wilgotność ziarna zmienia właściwości sprężyste ziarna, wysokość martwej strefy i prędkość wypływu, a tym samym wpływa istotnie na wartość i zwrot siły tarcia ziarna o ścianę zbiornika.

12. LITERATURA

1. ASAE Standards, EP433. *Loads exerted by free-flowing grains on bins.* St. Joseph, MI. 49085, 1989.
2. ASAE Standards, D274. *Flow of wheat through orifices.* St. Joseph, MI. 49085, 1991.
3. Balassy Z., Bochyński W., Horabik J., Molenda M.: *Triaxial and direct shear tests on mass of seeds of wheat.* Proceedings of the 4th International Conference "Physical Properties of Agricultural Materials", Rostock, 31-36, 1989.
4. Balassy Z., Horabik J., Molenda M.: *On friction properties of wheat grain.* ZPPNR, 378, 11-19, 1989.
5. Benink E.J.: *Flow and stress analysis of cohesionless bulk material in silos related to codes.* Ph.D. Dissertation, University of Twente, Department of Mechanical Engineering, Enschede, The Netherlands, 1989.
6. Bock R.G., Puri V.M., Manbeck H.B.: *Modeling stress relaxation response of wheat en masse using the triaxial test.* Transactions of the ASAE, 32(5), 1701-1708, 1989.
7. Borcz A.: *Experimentally determined pressure exerted on walls and bottom in grain silos.* Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 52, Wrocław 1987.
8. Borcz A.: *Silosy w przemyśle materiałów wiążących.* Prace nauk. Inst. Bud. PWr., Wrocław 1987.
9. Borcz A., Maj M., Trochanowski A.: *Wytyczne projektowania, budowy i użytkowania silosów żelbetowych.* Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 61, Wrocław 1991.
10. Boruszak A., Sygulski R.: *Parcie materiałów sypkich na ściany silosów.* Inż. i Bud. nr 10, 393-397, 1972.
11. Brubaker J.E., Pos J.: *Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces.* Transactions of the ASAE, 8(1), 53-55, 1965.
12. Bucklin R.A., Thompson S.A., Ross I.J.: *Bin wall failure caused by eccentric discharge of free-flowing grain.* ASCE Journal of Structural Engineering, 116(11), 3175-3190, 1990.
13. Bucklin R.A., Thompson S.A., Ross I.J.: *Flow patterns in model grain bins.* Transactions of the ASAE, 34(2), 577-585, 1991.
14. Canadian Farm Building Code. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa 1977.
15. Clower R.E., Ross I.J., White G.M.: *Properties of compressible granular materials as related to forces in bulk storage structures.* Transactions of the ASAE, 16(3), 476-481, 1973.
16. Colijn H., Peschl I.A.S.Z.: *Non-symmetrical bin flow problems.* Bulk Solids Handling, 1(3), 377-384, 1981.
17. Deutsch G.P., Schmidt L.C.: *Pressures on silo walls.* Transactions of the ASME, 91, 450-459, 1969.
18. DIN 1055, Part 6. *Design loads for bildings: load in silo bins.* Deutsche Norm, 1987.
19. Drescher A.: *Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach.* PWN, Warszawa 1983.
20. Dziendziel A., Kobielak S., Rybiański M.: *Obliczanie parć poziomych w silosach na przetwory zbożowe.* Materiały VI Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt.: Problemy techniki pobierania, doprowadzania i dozowania materiałów ziarnistych, Warszawa, 42-58, 1979.
21. Grabiec K.: *Konstrukcje cienkościenne.* PWN, Warszawa-Poznań 1978.
22. Grochowicz M.: *An evaluation of internal friction of wheat grain.* 4. Tagung of Agrophysik, Rostock, 140-145, 1987.
23. Grochowicz M., Horabik J., Molenda.: *Zastosowanie aparatu trójosiowego ściskania do badania właściwości machanicznych ośrodków rozdrobnionych pochodzenia roślinnego.* ZPPNR, 320, 107-114, 1987.
24. Grochowicz J., Horabik J., Molenda M.: *The influence of surface roughness and moisture content on friction of wheat grain.* ZPPNR, 397, 33-39, 1991.

25. Grundas S., Horabik J.: *Wpływ wilgotności na lepko-sprężyste właściwości zboża*. Polskie Towarzystwo Biofizyczne, Biofizyka (prace doświadczalne), Siedlce, 299-316, 1980.

26. Haman J., Grochowicz M.: *Methodology of determination of the internal friction coefficient of grain layer at increased strains*. ZPPNR, 203, 153-159, 1978.

27. Hampe E., Flatau K.A.: *Silo pressure due to eccentric discharge*. 11th Working Session of the IASS Committee of Pipers and Tanks. Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 39, Wrocław, 161-178, 1983.

28. Horabik J. Molenda M.: *Die Anwendung des Dreiachsenapparats zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften der Kornmasse*. Wissenschaftlichen Tagung Agrophysik, Reinhardsbrunn, NRD, 355-358, 1984.

29. Horabik J.: *Description of the initial phase of gravitational discharge of granular material from a hopper*. International Agrophysics, 2(1), 31-43, 1986.

30. Horabik J., Molenda M.: *Wpływ orientacji przestrzennej ziaren próbki na kąt tarcia wewnętrznego mierzony metodą trójosiowego ściskania*. ZPPNR, 351, 133-140, 1988.

31. Horabik J., Molenda M.: *Force and contact area of wheat grain in friction*. J. agric. Engng Res. 41, 33-42, 1988.

32. Horabik J.A., Ross I.J., Schwab C.V.: *Effects of spatial orientation on grain load distribution*. Transactions of the ASAE, 31(6), 1787-1793, 1988.

33. Horabik J., Molenda M.: *True contact area between wheat grain and a flat surface*. ZPPNR, 378, 63-68, 1989.

34. Horabik J., Molenda M.: *Factors affecting friction of single wheat grain*. Proceedings of the 4th International Conference "Physical Properties of Agricultural Materials", Rostock, 280-284, 1989.

35. Horabik J., Molenda M.: *Effects of moisture content on friction of wheat grain at a single contact area*. Powder Handling Processing, 1(3), 277-279, 1989.

36. Horabik J., Ross I.J., Schwab C.V.: *The influence of side filling on load distribution in the bin*. ZPPNR, 389, 69-78, 1991.

37. Horabik J., Ross I.J., Schwab C.V.: *Wall and bottom loads in a model grain bin during discharge*. Transactions of the ASAE, 34(2), 617-620, 1991.

38. Horabik J., Schwab C.V., Ross I.J.: *Non symmetrical loads in a model grain bin during eccentric discharge*. Transactions of the ASAE, 35(3), 987-992, 1992.

39. Horabik J., Molenda M., Thompson S.A., Ross I.J.: *Asymmetry of bin loads induced by eccentric discharge*. Transactions of the ASAE, 36(2), 577-582, 1993.

40. Horabik J., Molenda M.: *Opory tarcia i naprężenia w strefie kontaktu ziarniaka pszenicy z płaską powierzchnią*. Annales UMCS, Vol. XLV/XLVI, 20, 181-193, 1991.

41. Hrebecki P., Fan Jian Hua.: *Badania naporu mąki i otrąb w silosach*. Inż. i Bud. nr 5, 150-151, 1992.

42. Janssen H.A.: *Versuche über Getreidedruck in Silozellen*. Verein Deutscher Ingenieure, Zeitschrift (Dusseldorf), 39, 1045-1049, 1895.

43. Jenike A.W.: *Denting of circular bins with eccentric drawpoints*. ASCE Journal of the Structural Division, 93, 27-35, 1967.

44. Ketchum M.S.: *The designe of walls, bins and grain elevators*. McGraw-Hill Book Co., New York 1919.

45. Kamiński M., Zubrzycki M.: *Obciążenia w silosach na zboże*. Inż. i Bud. nr 10, 368-372, 1978.

46. Kamiński M., Zubrzycki M.: *Wpływ usytuowania otworu wysypowego w komorze silosu na napór poziomy zboża*. Inż. i Bud. nr 3, 86-89, 1979.

47. Kamiński M., Zubrzycki M.: *Żelbetowe silosy na zboże. Badania i projektowanie*. Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 41, Wrocław 1985.

48. Kamiński M.: *Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach*. Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 50, Wrocław 1986.

49. Kobiak J., Stachurski W.: *Konstrukcje żelbetowe*, t. 4, Arkady, Warszawa 1991.

50. Lawton P.J.: *Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials*. J. agric. Engng Res. 25(1), 75-86, 1980.

51. Loewer O.J., Ross I.J., Kratzer D.D., Walker J.N.: *Properties of ground shelled corn as related to forces in bulk storage structures*. Transactions of the ASAE, 20(1), 155-156, 1977.

52. Łapko A., Stachurski W.: *Doświadczalne określenie efektów działania materiału sypkiego na ściany silosów przy różnym usytuowaniu otworów wysypowych*. Inż. i Bud. nr 8, 281-285, 1984.

53. Łapko A., Stachurski W.: *Badania wpływu niesymetrycznego opróżniania na wielkości współczynników dynamicznych w komorach silosów na zboże*. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. nr 84, Budownictwo, Warszawa, 81-105, 1984.

54. Łapko A.: *Efekty oddziaływania materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, nr 71, Białystok 1989.

55. Manbeck H.B., Nelson G.L.: *Methods and instrumentation for evaluating the stress strain behavior of wheat en masse*. Transantions of the ASAE, 15(5), 919-923, 1972.

56. Manbeck H.B., Goyal M.G., Nelson G.L., Singh M.G.: *Dynamic overpressures in model bins during emptying*. ASAE Paper No. 77-4505. ASAE, St. Joseph, MI 49085, 1977.

57. McLean A.G., Arnold P.C., Martin D.J.: *Simplified mass-flow bin wall load predictions*. Bulk Solids Handling, 3(4), 787-793, 1983.

58. Metzger T.: *Analiza wpływu wybranych cech fizycznych ziarna kukurydzy na wartość współczynnika tarcia wewnętrznego*. Praca doktorska, Akademia Rolnicza, Wrocław 1985.

59. Mitzel A.: *Zbiorniki, zasobniki, silosy, kominy i maszty. Budownictwo betonowe*, t. XIII. Arkady, Warszawa 1966.

60. Mitzel A., Kamiński M., Zubrzycki M.: *Wstępne badania kinematyki przepływu ośrodka sypkiego w silosach za pomocą promieni rentgenowskich*. XX konferencja naukowa KILiW PAN – KN PZITB – Krynica, t. 2, 209-216, 1974.

61. Molenda M.: *Identyfikacja elementarnych mechanizmów tarcia ziarna pszenicy*. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin 1991.

62. Molenda M., Horabik J., Ross I.J.: *Loads in model grain bins as affected by filling method*. Transactions of the ASAE, 36(3), 915-919, 1993.

63. Moore D.W., White G.M., Ross I.J.: *Friction of wheat on corrugated metal surfaces*. Transactions of the ASAE, 27(6), 1842-1847, 1984.

64. Moysey E.B.: *Active and passive pressures in deep grain bins*. Transactions of the ASAE, 22(6), 1409-1413, 1979.

65. Moysey E.B.: *The effect of grain spreaders on grain friction and bin wall pressures*. J. agric. Engng Res. 30, 149-156, 1984.

66. Moysey E.B., Shane Hiltz.: *Friction properties of fertilizers*. Can. Agric. Eng. 27(2), 79-84, 1985.

67. Mróz Z., Kwaszczyńska K.: *Pewne problemy brzegowe dla ciał rozdrobnionych o wzmocnieniu gęstościowym*. Rozpr. Inż. 19, 15-42, 1971.

68. Mróz Z., Szymański Cz.: *Gravity flow of a granular material in a converging channel*. Arch. Mech. Stos. 1971, 23, 897-917, 1971.

69. Munch-Andersen J., Nielsen J.: *Pressures in slender grain silos. Measurements in three silos of different sizes*. 2nd European Symposium on the Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids-Silo Stresses. Praha, Czechoslovakia, 1990.

70. Necasek M., Vrtel J.: *Force effects of particulate solids on silo walls by eccentric emptying (Experiments)*. 2nd European Symposium on the Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids-Silo Stresses. Praha, Czechoslovakia, 1990.

71. Nielsen J.: *Load distribution in silos influenced by anisotropic grain behaviour*. International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Newcastle, 1983.

72. Oda M.: *Fabrics and their effects on the deformation behaviours of sand*. Dept. Found. Engng. Fac. Engng. Saitama University, Special Issue, 1976.

73. Oda M.: *Significance of fabric in granular mechanics*. Proc. US-Japan Seminar, Sendai, Japan, 7-26, 1978.

74. Pieper K.: *Investigation of silo loads in measuring models.* Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME, 91, 365-372, 1969.

75. Pieper K.: *Silolasten.* Aufbereitungs-Technik, nr 11, 541-547, 1978.

76. Pieper K.: *Wskazówki do wyznaczania obciążeń silosów.* Inż. i Bud. nr 1, 20-24, 1981.

77. PN-89/B-03262. *Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kiszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.*

78. Ravenet J.: *Silo problems.* Bulk Solis Handling, 1(4), 667-679, 1981.

79 *Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular material* (ACI 313.77) (Revised 1983, Revised 1992) and Commentary. Amer. Concr. Inst., Detroit, MI.

80. Ross I.J., Bridges T.C., Loewer O.J., Walker J.N.: *Grain bin loads as affected by grain moisture content and vertical pressure.* Transactions of the ASAE, 22(3), 592-597, 1979.

81. Rotter J.M., Berry P.A.: *The discrete rupture surface theory for silos under eccentric discharge.* 2nd European Symposium on the Stress and strain Behaviour of Particulate Solids-Silo Stresses. Praha, Czehoslovakia, 1990.

82. Rybiański M.: *Wpływ smukłości komory na obciążenia w opróżnianych centrycznie i niecentrycznie silosach zbożowych.* XXIX konferencja naukowa KILiW PAN – KN PZITB – Krynica, t. 2, 151-156, 1983.

83. Rybiański M.: *Obciążenia den silosów o różnej smukłości komór.* Inż. i Bud. nr 4-5, 179-180, 1986.

84. Rybiański M.: *Obciążenia den zbiorników na materiały sypkie opróżnianych centrycznie i niecentrycznie.* XXXIII konferencja naukowa KILiW PAN – KN PZITB – Krynica, t. 1, 109-114, 1987.

85. Rybiański M., Kramnik J.: *Parcie materiału sypkiego w zbiornikach o różnych rodzajach przepływu.* Inż. i i Bud. nr 6, 241-244, 1991.

86. Safarian S.S.: *Design Pressure of Granular materials in silos.* ACI Journal, 647-655, 1969.

87. Schwab, C.V.: *Grain pressure phenomenon in a circular flat bottom bin.* PhD. Disseration, University of Kentucky, Lexington, Kentucky 1989.

88. Schwedes J.: *Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern.* Verlag Chemie, 1970.

89. Schwedes J.: *Evolution of Bulk Solids Technology Since 1974.* Bulk, Solids, Handling, 3(1), 143-147, 1983.

90. Schwedes J.: *Influence of wall friction on silo design in process and structural engineering.* Ger. Chem. Eng., 8, 131-138, 1985.

91. Singh Divgir, E.B. Moysey.: *Grain bin wall pressures: Theoretical and experimental.* Can. Agric. Eng., 27(1), 43-48, 1985.

92. Snyder L.H., Roller W.L., Hall G.E.: *Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces.* Transactions of the ASAE, 10(3), 411-419, 1967.

93. Steward B.R., Hossain Q.A., Kunze O.R.: *Friction coefficients of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces.* Transactions of the ASAE, 12(4), 415-418, 1969.

94. Szot B., Horabik J., Molenda.: *The effect of the spatial orientation of cereal grain in bulk on its mechanical behaviour.* Collection of papers, Faculty of Mechanization, College of Agriculture in Prague, 873-878, 1985.

95. Theimer O.F.: *Failures of reinforced concrete grain silos.* Transactions of the ASME, 91, 460-477, 1969.

96. Thompson S.A., Ross I.J., Walker J.N., Wells L.G.: *Vertical wall loads in a model grain bin.* Transactions of the ASAE, 21(5), 1344-1348, 1982.

97. Thompson S.A., Ross I.J.: *Compressibility and frictional coefficient of wheat.* Transactions of the ASAE, 26(4), 1171-1176, 1983.

98. Thompson S.A., Prather T.G.: *Dynamic wall loads in a corrugated walled model grain bin.* Transactions of the ASAE, 27(3), 875-878, 1984.

99. Thompson S.A., Ursy J.L., Legg J.A.: *Loads in a model grain bin as affected by various unloading techniques.* Transactions of the ASAE, 29(2), 556-561, 1986.

100. Thompson S.A., Bucklin R.A., Batich C.D., Ross I.J.: *Variation in the apparent coefficient of friction of wheat on galvanized steel.* Transactions of the ASAE, 31(5), 1518-1524, 1988.

101. Tomczyk S.: *Magazyny ziarna i innych nasion*. PWRiL Warszawa 1970.

102. Williams J.C., Al-Salman D., Birks A.H.: *Measurement of static stresses on the wall of a cylindrical container for particulate solids.* Powder Technology, 50, 163-175, 1987.

103. Wol-Gajewska B.: *Zastosowanie związków teorii plastyczności do analizy nieustalonego wypływu ośrodków sypkich ze zbiorników.* Prace IPPT, 28/1978.

104. Zawidzki J.: *Ustalony dynamiczny grawitacyjny wypływ ośrodków sypkich*. Prace IPPT, 11/1971.

105. Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.: *Model for frictional behavior of wheat on structural materials*. Transactions of the ASAE, 31(3), 898-903, 1988.

106. Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B., Wang M.C.: *Elastoplastic constitute parameters of en masse wheat for a cyclic load model.* Transactions of the ASAE, 31(3), 910-916, 1988.

107. Zhang Q., Britton M.G., Jaremek R.: *Discharge loads in smooth and corrugated walled model bins for wheat, barley and canola.* ASAE Paper No. 91-4063, ASAE, St. Joseph, Michigan 49085, 1991.

108. Zubrzycki M.: *Badania efektów dynamicznych w silosach metalowych podczas ich eksploatacji.* Inż. i Bud. nr 4, 133-137, 1988.

LOAD DISTRIBUTION IN A MODEL BIN AS INFLUENCED BY MECHANICAL PROPERTIES OF WHEAT GRAIN

SUMMARY

To describe mechanical behaviour of a granular material it is indispensable to have parameters such as the coefficient of friction on a bin wall, the angle of internal friction and the bulk density and the k-value in Janssen's equation. The values of these parameters depend on many known and unknown factors. In the case of plant granular solids indisputable is the role of moisture content of grain, vertical pressure and sliding velocity.

The purpose of this study was to determine the influence of mechanical properties of wheat grain on wall and bottom load distribution in a model grain bin. A series of tests involving eight filling methods, eccentric discharge from five different locations of a bin orifice and three bin wall surfaces were conducted on a laboratory scale cylindrical bin 0.61 m in diameter and 2.44 m high. The wall and flat floor of the bin were supported independently on three load cells so that load distributions could be isolated.

Static and dynamic wall and bottom loads were found to be influenced by the filling method. Shower filling produced lower static load of the smooth wall as compared to central filling and higher static load of corrugated and rough walls. The experiments showed a significant influence of grain orientation on load distribution. Variable angle of internal friction within the Janssen differential element can explain the non-uniform load distribution obtained.

The horizontal bending moments exerted on the wall and floor of the bin during eccentric discharge were found to decrease with an increase in the bin wall friction coefficient and were influenced significantly by the orifice eccentricity ratio, with the maximum moment occurring at ER equal to 0.667. The horizontal pressure distribution around the circumference of the bin wall depends on the height from the floor. Near the floor of the bin the horizontal pressure was larger on the side of the bin opposite the discharge orifice, while for locations higher above the floor, the horizontal pressure was larger on the side nearest the discharge orifice.

As the ratio of the grain height to the bin diameter decreased below approximately 1 a change in the direction of the resultant friction force on the bin wall from a normal downward direction to an upward direction was observed. The change in direction of the resultant tangent force originates from the combination of the downward friction force of flowing grain and the upward friction force of the grain contained within the dead zone of the bin. Moisture content of grain influences its compressibility, friction against the bin wall, height of the dead zone and, in consequence, the upward movement of grains in the dead zone of the flat bottom bin during discharge.