

Prace Naukowe Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej

Seria: Monografie

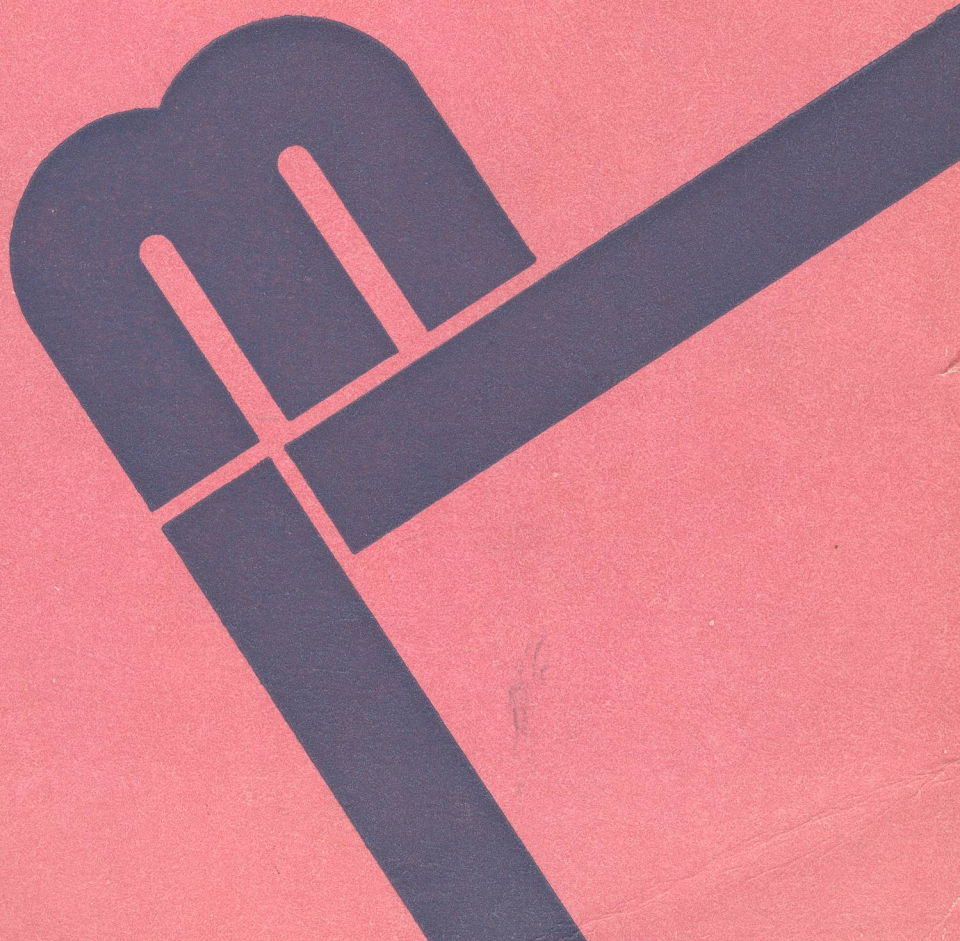
50

20

Mieczysław Kamiński

**Badania naporu bezkohezyjnych
materiałów sypkich w silosach**

Wrocław 1986



PRACE NAUKOWE POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Scientific Papers of the Institute of Building
of the Technical University of Wrocław

No 50

No 50

Monographs

No 20

1986

Mieczysław KAMIŃSKI

The study of the pressure exerted by cohesionless bulk solids
on the walls of a containing vessel (silo)

Prace Naukowe Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej

50

Seria:
Monografie

20

Mieczysław Kamiński

**Badania naporu
bezkohezyjnych materiałów sypkich
w silosach**



Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 1986

Recenzenci

Ryszard DĄBROWSKI

Igor KISIEL

Redaktor naczelny

Jerzy CIEKOT

Redaktor naukowy

Lech ŚLIWOWSKI

Opracowanie redakcyjne

Maria KOPEĆ

Korekta

Maria GALIK

2187 m/4
Instytutu Budownictwa
BI-2

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324 – 9875

Nakład 180 + 70 egz. Ark. wyd. 18,5. Ark. druk. 157/8. Papier offset. kl. III, 70 g, B1.

Oddano do druku we wrześniu 1986 r. Druk ukończono w listopadzie 1986 r.

Zakład Graficzny Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 3160/86 – Cena zł 185,–

*silos, materiały sypkie, napór,
eksploatacja, dynamika*

Mieczysław KAMIŃSKI *

BADANIA NAPORU BEZKOHEZYJNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH W SILOSACH

Podano wyniki teoretycznych i eksperymentalnych badań oddziaływań materiałów sypkich w silosach. Celem pracy jest wyznaczenie wpływu różnych parametrów na rozkład i wartości naporu działającego na dno i ściany silosów w trakcie ich napełniania i opróżniania. Na tle dotychczasowych badań przedstawiono również wyniki pomiarów własnych wykonanych na modelach i obiektach w skali naturalnej.

Wyniki badań wykazały, że wartości i rozkład naporu w silosach zależą od dużej liczby parametrów w większości nie uwzględnianych w rozwiązaniach teoretycznych.

Zamieszczone w pracy badania obejmowały wpływy takich parametrów, jak: rodzaj materiału sypkiego, kształt przekroju poziomego i pionowego komory, sztywność konstrukcji ścian i dna, szorstkość wewnętrznych powierzchni ścian oraz niektóre warunki eksploatacji, np. sposób napełniania silosu, usytuowanie otworów wysypowych, intensywność zasypywania i poboru materiału sypkiego z komory itp.

Dodatkowo wykazano negatywny wpływ dynamicznych zmian naporu materiału sypkiego na stany nośności i użytkowania silosów żelbetowych. Podano również własne propozycje wyznaczania rozkładu i wartości naporu materiału sypkiego w silosach opróżnianych niesymetrycznie.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a, b - wymiary przekroju poziomego komory prostokątnej,
- a_f - szerokość rozwarcia rysy,
- d - średnica otworu wysypowego,
- D - średnica komory silosu,
- e - mimośród usytuowania otworu wysypowego,
- E_a - współczynnik sprężystości stali,

*) Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 50-370 Wrocław,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27.

- E_b - współczynnik sprężystości betonu,
- E_m - współczynnik sprężystości materiału sypkiego,
- E_{s1}, E_{s2} - współczynniki sprężystości materiału ściany komory w kierunku pierścieniowym i pionowym,
- f - współczynnik tarcia materiału sypkiego o ścianę,
- f_1 - współczynnik tarcia wewnętrznego materiału sypkiego,
- F - powierzchnia przekroju poziomego komory silosu,
- F_{s1}, F_{s2} - powierzchnie przekrojów ściany silosu w kierunku pierścieniowym i pionowym,
- g - przyspieszenie ziemskie,
- h - wysokość słupa materiału sypkiego,
- h_s - grubość ściany silosu,
- H - wysokość ściany komory,
- k - iloraz naporu poziomego i pionowego materiału sypkiego,
- K - współczynnik zagęszczenia materiału sypkiego,
- n - współczynnik zmiany naporu,
- N_1 - pierścieniowa siła w ścianie komory,
- N_2 - pionowa siła w ścianie komory,
- p_h - napór poziomy materiału sypkiego,
- p_{hn} - napór poziomy materiału sypkiego po napełnieniu,
- p_{ho} - napór poziomy materiału sypkiego podczas opróżniania symetrycznego,
- p_{hn-o} - napór poziomy podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania,
- p_{ho} - poziomy napór podczas opróżniania niesymetrycznego silosu przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku e względem osi komory,
- p_h^t - dodatkowy napór wywołany zmianą temperatury zewnętrznej,
- p_v - napór pionowy materiału sypkiego,
- p_{vn} - napór pionowy materiału sypkiego po napełnieniu,
- p_{vo} - napór pionowy materiału sypkiego w trakcie opróżniania,
- p_t - napór styczny,
- Q - intensywność opróżniania komory silosu (wydatek),
- r - promień kołowego sklepienia materiału sypkiego,
- r_h - hydrauliczny promień komory, $r_h = F/U$,
- R - geometryczny promień komory okrągłej,
- Δt - różnica temperatury,
- U - długość wewnętrznego obwodu ściany komory w przekroju poziomym,
- z - rzędna głębokości mierzona od górnej powierzchni materiału sypkiego lub od środka ciężkości stożka nasypowego,
- α_t - współczynnik rozszerzalności liniowej,
- γ - ciężar objętościowy materiału sypkiego,
- γ_s - ciężar objętościowy materiału ściany silosu,

- Δ - wartość przemieszczenia konstrukcji ściany lub dna,
- $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z$ - jednostkowe odkształcenia materiału sypkiego w promieniowym układzie współrzędnych,
- σ - naprężenie normalne,
- τ - naprężenie styczne,
- φ_t, φ_n - współczynniki pełzania materiału sypkiego (wartość w czasie t oraz wartość graniczna dla $t \rightarrow \infty$),
- Φ_s - kąt tarcia materiału sypkiego o ścianę,
- Φ_u - kąt tarcia wewnętrznego materiału sypkiego,
- ν_m - współczynnik Poissona,
- θ - kąt odchylenia ściany silosu od pionu.

1. WSTĘP

Problem badania naporu materiału sypkiego w silosach pojawił się pod koniec ubiegłego stulecia wraz z rozpoczęciem budowy pierwszych dużych silosów na zboże.

Początkowo napór materiału sypkiego w silosach obliczano identycznie jak ciśnienie cieczy. Pogląd ten obalili dopiero Roberts [143, 144], który pierwszy wykonał w 1882 r. badania na obiekcie w skali naturalnej. Wyniki tych badań wykazały, że napór materiału sypkiego zmienia się nieliniowo wzdłuż wysokości komory, a część ciężaru tego materiału przekazuje się przez tarcie na ściany silosu.

Podobne badania w 1885 r. prowadził Janssen [56] i na podstawie uzyskanych wyników opracował teorię obliczania naporu materiału sypkiego w silosach. Rozwiązanie Janssena, wraz z wprowadzoną później poprawką Koenena [80], stosowane jest do dziś w praktyce inżynierskiej w obliczaniu naporu działającego po napełnieniu silosu.

Najwięcej rozbieżności budzi ocena naporu materiału sypkiego działającego na ściany i dno silosu w trakcie jego opróżniania.

W 1886 r. Prante [136] wykazał eksperymentalnie, że opróżnianie silosu jest przyczyną powstawania znacznego wzrostu wartości naporu poziomego działającego na ściany silosu. Od tego momentu notuje się intensywny rozwój eksperymentalnych i teoretycznych badań silosów.

Mimo ogromnego postępu w wynikach prac teoretycznych i doświadczalnych poświęconych badaniom oddziaływań materiałów sypkich w silosach, zagadnienie wyznaczania wartości naporu na ściany i dno komory nie jest dotychczas zadowalająco rozwiązane.

Wyniki prowadzonych badań wykazują, że wartości naporu materiału sypkiego w silosach zależą od różnych parametrów związanych z cechami materiału, z geometrią i własnościami konstrukcji komory oraz z warunkami

eksploatacyjnymi. Obecnie wpływ wielu z tych parametrów jest pomijany podczas określania wartości naporu. Jest to m.in. przyczyną powstawania awarii konstrukcji silosów.

W Polsce opracowano kilka obszernych monografii poświęconych w całości lub w części problemom projektowania silosów na materiały sypkie [42,74,75,100,110,139]. Te właśnie prace zainspirowały autora do przeprowadzenia własnych badań eksperymentalnych poświęconych wyznaczaniu naporu materiału sypkiego.

Ostatnio ukazały się również dwie prace monograficzne, z których jedna jest poświęcona teoretycznym zagadnieniom wyznaczania naporu materiału sypkiego w silosach [24], druga zaś przedstawia problemy badań i projektowania żelbetowych silosów na zboże [71].

Godne podkreślenia jest, iż prace polskich autorów zdobyły duże uznanie także za granicą, przyczyniając się tym samym do znacznego wzbogacenia wiedzy o obciążeniach silosów. Warto tutaj wymienić zarówno teoretyczne, jak i eksperymentalne wyniki badań prowadzonych m.in. pod kierunkiem A.Borcza, R.Dąbrowskiego, A.Dreschera, A.Dziendziela, A.Mitzela, Z.Mroza, W.Stachurskiego, J.Suwalskiego oraz Cz.Szymańskiego.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Zasadniczym celem niniejszego opracowania jest przedstawienie i u-systematyzowanie aktualnych wyników badań materiałów sypkich w silosach, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów decydujących o rozkładzie i wartości naporu działającego na ściany i dno komór.

Praca została podzielona na 7 rozdziałów. Rozdziały 1 i 2 stanowią wprowadzenie do pracy. W rozdziale 3 przedstawiono zarys podstaw teoretycznych wyznaczania naporu materiałów sypkich w silosach. W rozdziale tym podano definicje i objaśnienia stanów naprężeń w materiale sypkim i omówiono wybrane przykłady metod wyznaczania naporu.

Wyniki badań wybranych parametrów geometrii komór, własności konstrukcji ścian i dna silosów oraz warunków ich eksploatacji wpływających na wartość i rozkład naporu poziomego materiału sypkiego przedstawiono w rozdz.4. Uwzględniono tutaj takie parametry, jak: smukłość komory, kształt ścian i dna, szorstkość ścian, podatność konstrukcji, sposób napełniania, intensywność napełniania i opróżniania oraz wpływ jednoczesnego napełniania i opróżniania silosu.

Rozdział 5 poświęcono badaniom silosów opróżnianych niesymetrycznie. Omawiając problem ten w świetle aktualnego stanu wiedzy przedstawiono także wyniki badań własnych, które stały się podstawą opracowania nowej propozycji wyznaczania obciążeń.

W rozdziale 6 zamieszczono przede wszystkim wyniki badań własnych, obejmujących pomiary naporu materiału sypkiego w silosach typu koncentrycznego. Badania te zostały wykonane na zlecenie przemysłu w związku z rozpoczęciem projektowania tego typu obiektów na eksport.

W rozdziale 7 omówiono wpływ dynamicznych oddziaływań materiału sypkiego na pracę żelbetowych ścian silosów.

W pracy omówiono jedynie badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich, ponieważ zagadnienie dotyczące oddziaływań materiałów sypkich z kohezją, np. mąki, cementu i pasz, jest tak obszerne, że wymagałoby oddzielnego omówienia.

Praca stanowi rozszerzone omówienie problemów obciążeń silosów częściowo przedstawionych w monografii Kamińskiego i Zubrzyckiego^{*)}. Obejmuje ona przede wszystkim wyniki badań przeprowadzonych na silosach przeznaczonych do magazynowania zboża i cukru. Badania wykonano na modelach silosów oraz na obiektach w skali naturalnej.

Główny nacisk położono na wyniki prac eksperymentalnych, którymi autor zajmował się w latach 1978-1984.

Obszerne omówienie wyników badań naporu materiałów z kohezją, np. mąki, cementu i mączki surowcowej można znaleźć w dostępnych opracowaniach krajowych, m.in. [8,9,10,11,25,26,27,28,76,98,99].

W pracy pominięto również zagadnienia obciążeń silosów na zboże z komorami wyposażonymi w rurowe urządzenia odciążające. Wyniki badań takich silosów przedstawiono w pracach [71-73,92,139 i 140].

3. PODSTAWY TEORETYCZNE WYZNACZENIA NAPORU MATERIAŁU SYPKIEGO W SILOSACH

3.1. Funkcja naporu

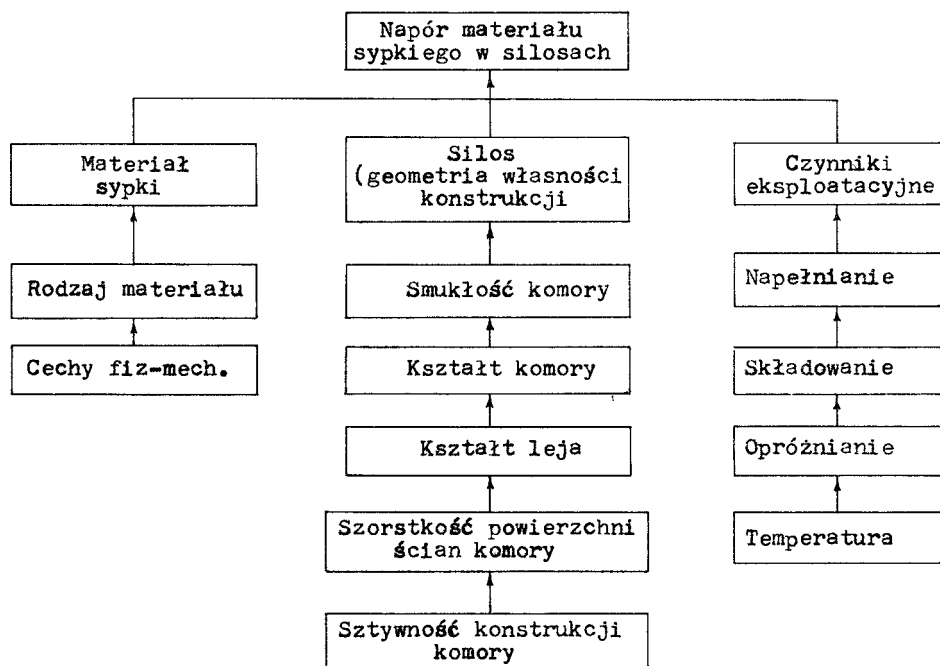
Wartość naporu materiału sypkiego w silosach zależy od wielu parametrów, które można podzielić na trzy następujące grupy:

- a) parametry związane z materiałem sypkim,
- b) parametry związane z geometrią silosów i właściwościami ich konstrukcji,
- c) parametry związane z eksploatacją silosów.

Schemat podziału tych parametrów przedstawiono na rys.3.1.

Materiał sypki jest charakteryzowany najczęściej przez jego cechy fizyczne, np. ciężar objętościowy, kąt tarcia wewnętrzznego oraz kohezję.

^{*)} Kamiński M., Zubrzycki M., Żelbetowe silosy na zboże, Wyd. PWR., Wrocław 1985.



Rys.3.1. Schemat podziału parametrów wpływających na napór materiału sypkiego w silosach

Fig.3.1. Parameters affecting bulk solid pressures in silos

Geometrię silosu określają jego wymiary (wysokość i promień hydrauliczny), kształt przekroju poziomego komory i leja oraz kąt pochylenia ścian w przekroju pionowym. Do właściwości konstrukcji silosu można zaliczyć stopień podatności ścian komory i leja oraz szorstkość ich powierzchni.

Parametry eksploatacyjne natomiast obejmują procesy napełniania i opróżniania silosu, a także wpływy temperatury.

Funkcję naporu materiału sypkiego można zatem zapisać w następującej ogólnej postaci:

$$p = p(\gamma_o, \Phi_u, c, H, r_h, K_{pp}, \alpha, EJ, S_n, S_o, v, \Delta t), \quad (3.1)$$

gdzie:

γ_o - ciężar objętościowy materiału sypkiego,

Φ_u - kąt tarcia wewnętrznego,

c - kohezja,

H - wysokość komory,

r_h - hydrauliczny promień poziomego przekroju komory,

K_{pp} - kształt poziomego przekroju komory,
 α - pochylenie ścian komory lub leja,
 EJ - sztywność konstrukcji komory,
 S_n, S_o - sposób napełniania i opróżniania silosu,
 v - prędkość przemieszczania się cząsteczek materiału sypkiego,
 Δt - różnica temperatury zewnętrznej i wewnętrznej.

Ponieważ większość parametrów wpływających na wartość naporu może ulegać zmianie w czasie, więc uwzględnienie ich w rozwiązaniach teoretycznych napotyka olbrzymie trudności.

Na przykład cechy fizyczne materiału sypkiego zależą od stanu jego zagęszczenia, wilgotności oraz wartości naprężeń działających w materiale sypkim.

Z kolei sztywność konstrukcji komory silosu zależeć będzie od stopnia zarysowania elementów żelbetowych, a w silosach zablokowanych także od stanu napełnienia sąsiednich komór.

Na wartości i rozkład naporu materiału sypkiego duży wpływ mają również miejscowe zniekształcenia geometrii komór oraz występujące zmiany szorstkości ścian.

Przyjęcie zatem wszystkich parametrów jako wartości stałych mocno osłabia dokładność istniejących metod wyznaczania naporu materiału sypkiego w silosach.

3.2. Modele matematyczne wykorzystywane do opisu cech mechanicznych materiału sypkiego

Większość rozwiązań teoretycznych zagadnienia naporu materiału sypkiego w silosach opiera się na uproszczonym modelu ciała idealnie plastycznego, stosowanego początkowo tylko do opisu zachowywania się metali. Model ten, szczególnie opisany w pracach [41a, 122a], jest często stosowany w praktyce inżynierskiej, w tym także do określania naporu materiału sypkiego w komorach silosów.

W modelu idealnie plastycznym zakłada się, że deformacje plastyczne rozwijają się przy stałej wartości naprężenia. Stałość naprężeń oznacza, że warunek plastyczności jest jeden, a jego ogólną postacią jest funkcja tylko stanu naprężenia, tzn. $f(\sigma_{ij}) = 0$. Warunek ten jest reprezentowany geometrycznie na płaszczyźnie w postaci jednej krzywej, a w przestrzeni w postaci jednej płaszczyzny. Na podstawie modelu ciała idealnie plastycznego opracowano wiele teoretycznych rozwiązań zagadnienia naporu materiału sypkiego, m.in. prace [24, 58, 59, 97, 98, 165].

Część rozwiązań opiera się na modelu ciała plastycznego ze wzmocnieniem i osłabieniem, który ujmuje jakościowo wiele rzeczywistych cech materiału sypkiego, zależnych od stopnia jego wstępnego zagęszczenia. Wzmoc-

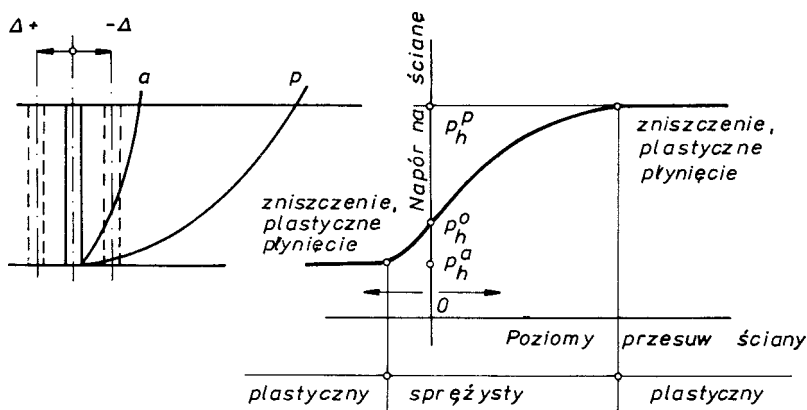
nienie lub osłabienie materiału oznacza, że warunek plastyczności nie może być funkcją tylko naprężenia, lecz także pewnego parametru związanego np. z gęstością materiału, tzn. $f(\sigma_{ij}, \rho) = 0$. Model ciała plastycznego ze wzmocnieniem odpowiada charakterystyce materiału luźnego, natomiast z osłabieniem opisuje cechy materiału sypkiego wstępnie zagęszczonego. Model ciała plastycznego ze wzmocnieniem i osłabieniem zastosowany został w Polsce przez Mroza [95].

Znane są również próby wprowadzenia do opracowań teoretycznych modelu sprężystego materiału sypkiego przez powiązanie naprężenia w pewnych punktach z polem deformacji za pomocą prawa Hooke'a. Przykładem takim jest praca Szymańskiego i Mroza [153].

Ostatnio jest wprowadzany także do obliczeń naporu materiału sypkiego w silosach nieliniowy model sprężysto-plastyczny. Rozwiązanie zagadnienia naporu materiału sypkiego w tym przypadku jest możliwe przez wykonanie numerycznych obliczeń, np. zastosowanie metody elementów skończonych. Model sprężysto-plastyczny opisany przez Ladego [87] został wykorzystany np. w obliczeniach Eibla [30].

3.3. Stan naprężeń w materiale sypkim

Materiał sypki w silosie może znajdować się w dwóch różnych stanach naprężeń. Poglądową definicję tych stanów przedstawił Kozłowski [77], który rozpatrywał płaską ścianę oporową z możliwością jej poziomego przemieszczania się (rys.3.2).

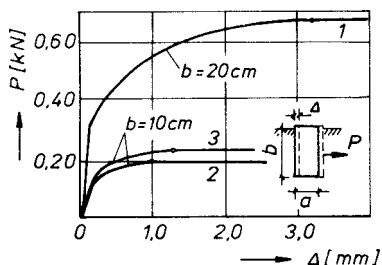


Rys.3.2. Wykres zależności między przemieszczeniem ściany oporowej a wartością naporu materiału sypkiego
Fig.3.2. Displacement of the retaining wall as a function of bulk solid pressure

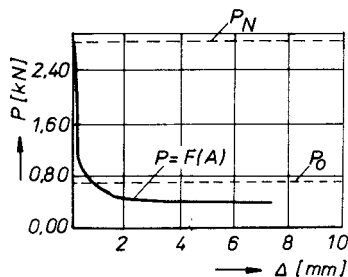
W stanie spoczynku ściana nie przemieszcza się i działa na nią napór p_h^0 . Pod wpływem obciążenia ściana poddaje się przesuwu w kierunku działania naporu materiału sypkiego. Napór na ścianę zmniejsza się proporcjonalnie do wartości przemieszczeń tak długo, dopóki w materiale sypkim nie zostaną przekroczone naprężenia ścinania i nie powstanie stan zniszczenia wzdłuż linii poślizgu. Po osiągnięciu tego stanu rozpoczyna się plastyczne płynięcie materiału sypkiego, który znajduje się w czynno-plastycznym stanie naprężeń. Wartości naporu poziomego p_h^a , panującego w tym stanie, są stałe i nie ulegają zmianom, pomimo dalszego przemieszczania się ściany.

Gdy ściana oporowa wskutek działania sił zewnętrznych porusza się w kierunku materiału sypkiego, wartości naporu poziomego p_h^0 powiększają się. Wskutek takiego przesunięcia ściany następuje kompresja materiału sypkiego oraz wzrost wartości naprężeń ścinających, co wywołuje zwiększenie wartości naporu p_h^0 . Wzrost tego naporu występuje do momentu, gdy zostanie przekroczona wytrzymałość materiału sypkiego na ścinanie i znów pojawi się stan graniczny, w którym tworzą się krzywoliniowe linie poślizgu. Materiał sypki znajduje się w bierno-plastycznym stanie naprężeń, w którym dalsze przemieszczanie ściany nie powoduje już wzrostu wartości naporu poziomego. Na podstawie rys.3.2 można stwierdzić, że stan naprężeń jest określony w zasadzie przez ruch ściany, która ogranicza materiał sypki, oraz przez wytrzymałość tego materiału na ścinanie.

a) GLUŠKOV [39]



b) JAROPOLSKI [57]



Rys.3.3. Przykłady wyników badań czynnego i biernego stanu naprężeń w materiale sypkim

Fig.3.3. Examples of active and passive pressures in a bulk solid

Czynny i bierny stan naprężeń w mechanice gruntów jest badany od dawna. Wybrane wyniki z tych badań przedstawiono na rys.3.3.

Badania Jaropolskiego [57] wykazały, że czynny napór piasku na pionowej ściance jest funkcją jej przemieszczeń (rys.3.3b). Jeżeli ścianka nie porusza się, to napór piasku wyrazić można wzorem:

$$p_h^o = \frac{1}{2} k_o \gamma h^2, \quad (3.2)$$

gdzie k_o - współczynnik spoczynkowego naporu gruntu.

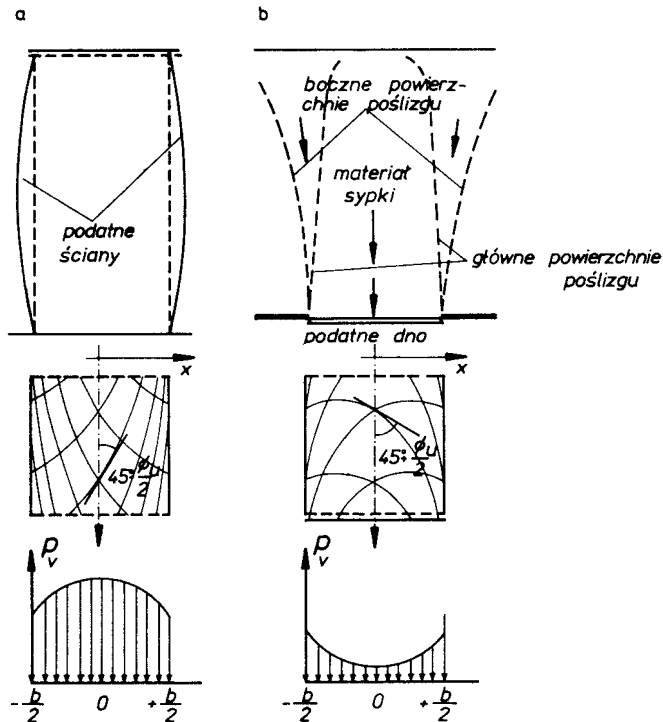
Gdy są małe przemieszczenia ścianki (około 0,1 do 0,2 mm), pojawiają się w materiale sypkim siły tarcia wewnętrzne i w końcowej fazie tych przemieszczeń wartość naporu można wyrazić wzorem Coulomba:

$$p_h = \frac{1}{2} k \gamma h^2, \quad (3.3)$$

gdzie k - współczynnik czynnego naporu gruntu.

Gdy przemieszczenia przekraczają 0,2 mm, napór na ściankę wynika z oddziaływania rozluźnionego piasku. Wartość naporu poziomego piasku, w zależności od jej przemieszczenia Δ , można obliczyć według Jaropolskiego z następującego wzoru:

$$p_h = \frac{0,1077 \gamma h^2}{(\Delta + 0,000001)^{0,111}}. \quad (3.4)$$



Rys.3.4. Obraz linii poślizgu i rozkład naporu pionowego w prostokątnej komorze silosu wg [111]: a - czynno-plastyczny stan naprężeń, b - bierno-plastyczny stan naprężeń

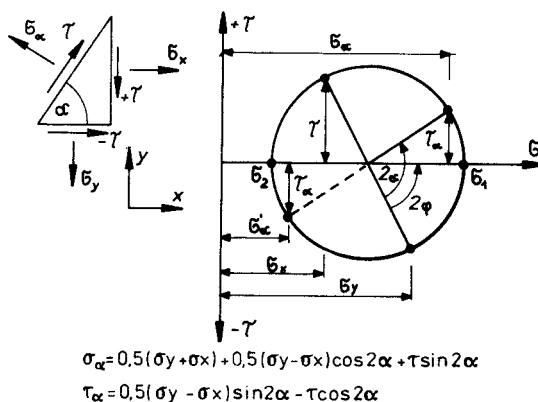
Fig.3.4. Path of shear and the distribution of a vertical pressure in a rectangular chamber of a silo: a - plastic-active state of stress, b - plastic-passive state of stress

Głuśkov [39] wykonał badania, których celem było określenie funkcji naporu biernego działającego na model betonowego bloku przesuwanego w piasku. Wykresy tej funkcji przedstawiono na rys.3.3a. Widać tu wyrażenie trzy etapy zmian wartości naporu biernego. Początkowo między siłą przesuwającą model bloku betonowego a jego przemieszczeniem istnieje zależność liniowa. W następnej fazie ruchu proporcjonalność ta zanika, a później występuje równomierny przesuw bloku wraz ze stałym odporem piasku.

Czynno-plastyczny stan naprężeń w silosie może pojawić się wówczas, gdy ściany komory poddadzą się w takim stopniu, że powstające powierzchnie poślizgu w materiale sypkim będą odchylone w stosunku do osi silosu o kąt $45^\circ - 0,5 \phi_u$ (rys.3.4a). Biernie-plastyczny stan równowagi wystąpi w przypadku, gdy dno silosu przesunie się tak daleko, że powierzchnie poślizgu w materiale sypkim pochylone będą do osi silosu pod kątem $45^\circ + 0,5 \phi_u$ (rys.3.4b).

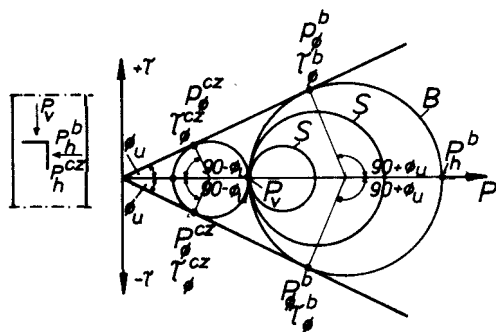
W czynno-plastycznym stanie równowagi wartości naporu pionowego materiału sypkiego są znacznie większe od wartości naporu poziomego. W biernie-plastycznym stanie równowagi istnieje odmienny rozkład wartości naporu materiału sypkiego. Wartości naporu pionowego w tym przypadku są mniejsze niż wartości naporu działającego w kierunku poziomym (rys.3.4a i 3.4b).

Ohde [111] dzięki badaniom eksperymentalnym stwierdził, że do osiągnięcia czynno-plastycznego stanu naprężeń w piasku potrzebne jest przemieszczenie ściany około 0,1-1,0% w stosunku do jej wysokości.



Rys.3.5. Stan naprężeń w materiale sypkim przedstawiony za pomocą koła Mohra

Fig.3.5. State of stress in a bulk solid by Mohr stress circle



CZ - czynno - plastyczny stan naprężeń

B - bierno - plastyczny stan naprężeń

S - sprężysty stan naprężeń

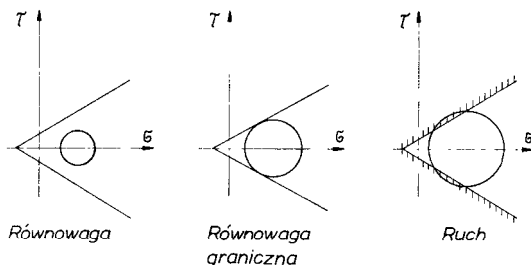
P_ϕ - naprężenie normalne w płaszczyźnie poślizgu

τ_ϕ - naprężenie styczne w płaszczyźnie poślizgu

Rys.3.6. Koła naprężeń dla bezkohezyjnego materiału sypkiego w silosie ze ścianami idealnie gładkimi

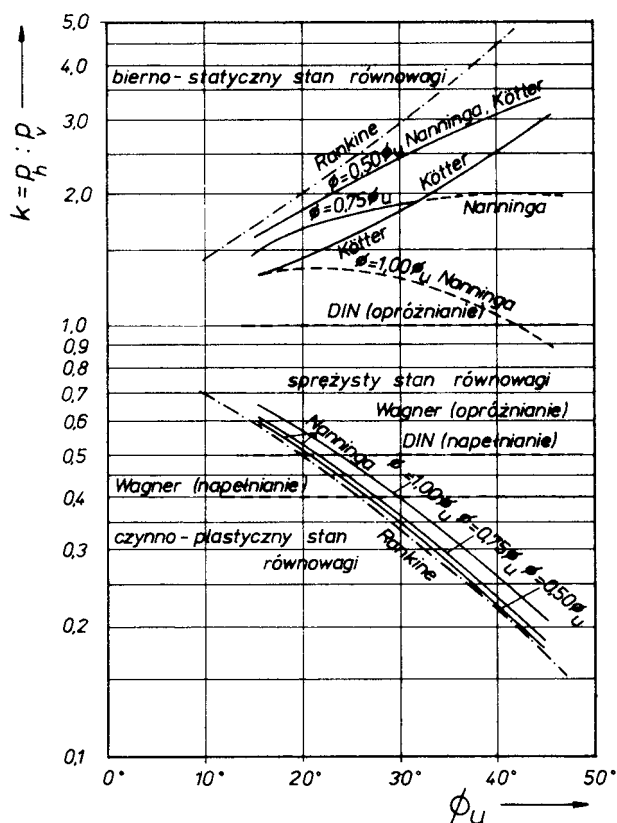
Fig.3.6. Mohr stress circles for a cohesionless bulk solid in a silo with perfectly smooths walls

Przez Ivanova i in. [52] wykonano pomiary naporu zboża w modelu silosu z wymuszonymi przemieszczeniami poziomymi ścian. Pomiary te wykazały, że czynno-plastyczny stan naprężeń w zbożu powstaje podczas przemieszczeń ściany większych od 0,5% wysokości komory silosu. Ponieważ odkształcenia tego rzędu w silosie w skali naturalnej nie mogą powstać, przeto po napełnieniu komory w materiale sypkim może wystąpić jedynie czynno-sprężysty stan naprężeń. Bierno-plastyczny stan naprężeń natomiast powstaje podczas opróżniania silosu.



Rys.3.7. Ilustracja przypadków stanu równowagi i ruchu materiału sypkiego

Fig.3.7. Illustrative states of equilibrium and of motion of a solid



Rys.3.8. Wykresy ilorazu naporu poziomego i pionowego w silosie z komorą o przekroju kołowym

Fig.3.8. Horizontal-to-vertical pressures ratio in a silo with a circular chamber

W rozważaniach dotyczących stanu naprężeń w dowolnym punkcie materiału sypkiego, podobnie jak w badaniach stanu napięcia ciała, można posługiwać się kołem Mohra. Wzajemne stosunki naprężeń, przedstawione za pomocą koła naprężeń, pokazano na rys.3.5.

Na rysunku 3.6 przedstawiono możliwe przypadki stanu naprężeń dla bezkohezyjnego materiału sypkiego, znajdującego się w komorze silosu ze ścianami idealnie gładkimi. Koła Mohra dla czynno-plastycznego i bierno-plastycznego stanu naprężeń zbudowano w ten sposób, że styczna do tych kół jest prostą równowagi granicznej spełniającą warunek Coulomba:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi_u. \quad (3.5)$$

Między tymi dwoma kołami naprężeń wyznaczyć można nieskończenie wiele kół naprężeń w stanie sprężystym. W stanie tym materiał sypki znajduje się również w stanie równowagi, lecz nie jest to jeszcze równowaga graniczna. Jeżeli wartość naprężeń $\tau(\sigma)$ przekroczy wartości graniczne określone prostą równowagi, to materiał sypki zaczyna płynąć (rys. 3.7).

Jedną z charakterystyk materiału sypkiego jest stosunek naprężeń ściskających, odpowiadający w silosie ilorazowi naporu poziomego i pionowego. Stosunek tych naprężeń zależy od kąta tarcia wewnętrznego materiału sypkiego oraz od stanu naprężeń. Obszerną analizę wyników badań w tym zakresie przedstawiono w pracach [109,162].

Na rysunku 3.8 przedstawiono za pracą [162] wykresy ilorazu naporu poziomego i pionowego według badań różnych autorów. Jako granice tych wartości przyjęto wykresy stosunku naprężeń określone przez Rankine'a w następującej postaci:

- w czynno-plastycznym stanie naprężeń

$$k = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_u}{2} \right) \quad (3.6)$$

- w bierno-plastycznym stanie naprężeń

$$k = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_u}{2} \right). \quad (3.7)$$

Obydwe granice stanów naprężeń obejmują sprężysty stan naprężeń równowagi, który bez dokładnej znajomości praw materiałowych nie może stanowić podstaw do rozwiązań analitycznych.

3.4. Omówienie wybranych metod wyznaczania naporu materiału sypkiego

Istniejące metody wyznaczania naporu materiału sypkiego w silosach można podzielić na trzy następujące grupy:

- rozwiązania oparte na ogólnej teorii równowagi granicznej,
- rozwiązania oparte na teorii sprężystości ośrodków ciągłych,
- rozwiązania oparte na hipotezie tworzenia się sklepień w materiale sypkim.

W rozwiązaniach tych rozpatruje się najczęściej pojedyncze komory silosów o przekroju kołowym lub prostokątnym. Przyjmuje się przy tym, że materiał sypki znajduje się w stanie statycznym (napełnianie) lub quasi-statycznym (opróżnianie).

Pierwszą metodę obliczania naporu materiału sypkiego w silosach opracował Janssen [56]. Istotą tej metody jest poszukiwanie wartości na-

prężen działających na element plastra materiału sypkiego o określonych wymiarach i spełniających układ równowagi sił, będących wypadkowymi tych naprężeń (rys.3.9). Podejście takie pozwoliło zastąpić cząstkowe równania różniczkowe równowagi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi, które łatwiej można scałkować. Janssen przyjął następujące założenia:

- rozkład naporu pionowego w przekroju poziomym silosu jest wartością stałą (tzn. $dp_v/dR = 0$),
 - iloraz naporu poziomego i pionowego jest stały wzdłuż wysokości komory ($p_h : p_v = k$),
 - dla określonego materiału sypkiego współczynnik tarcia materiału sypkiego o ścianę komory jest również wartością stałą $f = \operatorname{tg} \phi_s = p_\tau : p_h$.
- Z warunku równowagi sił $\Sigma V = 0$ otrzymał Janssen następujące równanie:

$$F p_v + \gamma F dz = F (p_v + dp_v) + U p_\tau dz. \quad (3.8)$$

W wyniku rozwiązania tego równania otrzymuje się:

$$p_v = \frac{\gamma F}{k \operatorname{tg} \phi_s U} \left(1 - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s U}{F} z} \right), \quad (3.9)$$

$$p_h = \frac{\gamma F}{\operatorname{tg} \phi_s U} \left(1 - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s U}{F} z} \right), \quad (3.10)$$

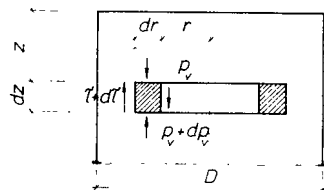
$$p_\tau = \frac{\gamma F}{U} \left(1 - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s U}{F} z} \right). \quad (3.11)$$

Wartości graniczne naporu dla $z \rightarrow \infty$ wynoszą:

$$p_{v\infty} = \frac{\gamma F}{k \operatorname{tg} \phi_s U}, \quad (3.12)$$

$$p_{h\infty} = \frac{\gamma F}{\operatorname{tg} \phi_s U}, \quad (3.13)$$

$$p_{\tau\infty} = \frac{\gamma F}{U}. \quad (3.14)$$



Rys.3.9. Schemat sił działających na wydzielony element materiału sypkiego (wg Janssena)

Fig.3.9. Forces acting on a portion of a solid (acc. to Janssen)

Wartości kąta tarcia materiału sypkiego o ścianę silosu ϕ wyznaczono eksperymentalnie. Iloraz k określił Janssen opierając się na pomiarach wartości naporu pionowego p_v . Koenen [80] rozszerzył stosowanie teorii Janssena na inne materiały sypkie, wprowadzając dla czynno-plastycznego stanu naprężeń iloraz k według wzoru (3.6).

Przyjęcie przez Koenena wartości współczynnika k a priori z teorii czynnego naporu gruntu na ściany oporowe jest błędne, ponieważ współczynnik ten nie odzwierciedla rzeczywistego stanu naprężeń w elemencie przysięciennym materiału sypkiego w silosie.

W pracach [19,110] wykazano, że wielkość tarcia w elemencie przysięciennym τ zależy od występującego tam współczynnika k , i na odwrót - strefa możliwych współczynników k zależy od rzeczywistego tarcia τ .

Przyjęcie przez Janssena warunku stałości naporu pionowego p_v jest sprzeczne z późniejszymi wynikami badań eksperymentalnych, które wykonał m.in. Pleissner [134] i Bovey [14]. Badania Janssena odnoszą się wyłącznie do materiału sypkiego, znajdującego się w spoczynku, i niestety, nie obejmują wzrostu naporu poziomego występującego podczas opróżniania silosu. Mimo ewidentnych braków teoria Janssena jest stosowana bardzo chętnie w praktyce projektowej z uwagi na proste wzory. Ewentualna korekta wartości naporu jest dokonywana za pomocą współczynników wyznaczonych eksperymentalnie.

Bracia Reimbertowie [139], opierając się na wynikach pomiarów, zastąpili wykładniczą funkcję we wzorach Janssena funkcją hiperboliczną. Rozwiązanie to również obejmuje jedynie czynno-plastyczny stan naprężeń. Do obliczania naporu podczas opróżniania Reimbertowie podali odpowiednie wartości współczynników korekcyjnych.

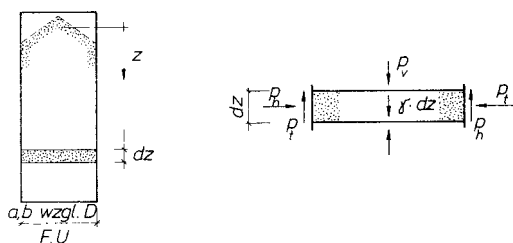
Wielu innych autorów rozwija teorię Janssena przez wprowadzenie do jego wzorów różnych wartości współczynnika k , bądź też uwzględnienie zmiany zagęszczenia materiału sypkiego [17,19,38,55,84,90,134,157].

Problem obliczania naporu znajdującego się w spoczynku między dwiema pionowymi ścianami został rozwiązany także przez Airego [119] oraz Sołowskiiego [150].

Interesującą propozycję obliczania naporu materiału sypkiego podali Isaacson i Boyd [50], którzy wyszli z założenia, że zmianę naporu pionowego w głębokim silosie $H : D > 5$) można opisać za pomocą następującego równania różniczkowego:

$$\frac{dp_v}{dz} + \beta p_v = \gamma g, \quad (3.15)$$

gdzie β - eksperymentalna funkcja zależna od głębokości z .



Rys.3.10. Schemat sił działających na wydzielony element materiału sypkiego (wg Lvin)

Fig.3.10. Forces acting on a portion of a solid (acc. to Lvin)

W wyniku rozwiązania tego równania otrzymuje się wzór wartości naporu pionowego, który przy ustawieniu odpowiednich założeń może prowadzić do rozwiązania Janssena lub Reimbertów.

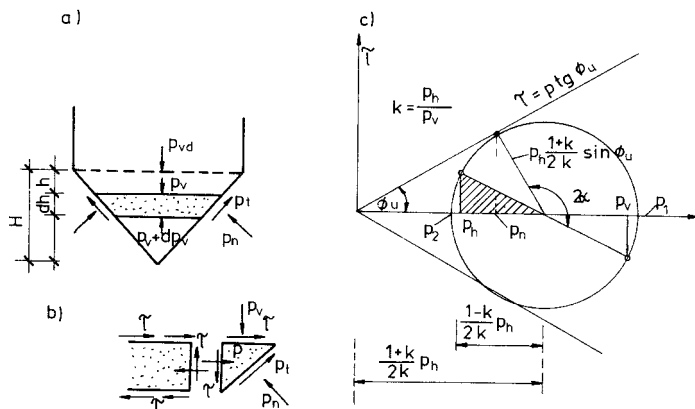
Wielu autorów podjęło próbę wyznaczania naporu materiału sypkiego z wykorzystaniem teorii równowagi granicznej zarówno w fazie napełniania, jak i opróżniania silosu. Na przykład Lvin [91] uogólnił rozwiązanie Janssena na komory o różnych kształtach. Zmienił on jednocześnie założenie dotyczące rozkładu naporu pionowego, przyjmąwszy jego wartość w funkcji promienia komory silosu. Lvin rozpatrywał warunki równowagi elementarnego wycinka materiału sypkiego o wymiarach $dz \times dr$ (rys.3.10).

Lvin rozróżnia dwie strefy procesu opróżniania wzdłuż wysokości komory silosu. W strefie pierwszej (górna część silosu) rozkład pionowego naporu jest funkcją promienia komory i wysokości napełnienia. W dolnej strefie zaś rozkład pionowego naporu zależy wyłącznie od promienia komory silosu. W jednej i drugiej strefie w każdym punkcie materiału sypkiego występuje graniczny kąt tarcia wewnętrznego. Tym samym Lvin zakłada, że materiał sypki znajduje się w czynno-plastycznym stanie równowagi granicznej. Z tego powodu jego rozwiązanie obejmować może proces napełniania lub początek opróżniania silosu.

Opisane metody wyznaczania naporu materiału sypkiego odnoszą się jedynie do silosu mającego ściany pionowe. W celu wyznaczenia obciążeń, np. ścianek leja silosu, niezbędne jest wprowadzenie nowych założeń. Rozszerzenie teorii Janssena na obszar leja należy do Dąbrowskiego i Nowackiego [19,110], którzy rozpatrują warunki równowagi warstwy materiału sypkiego wyciętej w leju ze ściankami nachylonymi pod kątem α do płaszczyzny poziomej (rys.3.11).

Z warunku równowagi elementarnej warstwy materiału sypkiego o obwodzie U (rys.3.11a) otrzymuje się następujące równanie [81]:

$$\gamma F d - F dp_v - p_v \cdot dF - p_n \frac{U dh}{\tan \alpha} - p_t U dh = 0. \quad (3.16)$$



Rys.3.11. Warunki równowagi i stan graniczny naprężeń w leju silosu wg prac [19 i 110]: a - schemat sił działających na elementarną warstwę materiału sypkiego, b - schemat sił działających na element przyścienny, c - stan graniczny w elemencie przyściennym przedstawiony za pomocą koła Mohra wg Dąbrowskiego [19]
 Fig.3.11. Conditions of equilibrium and limiting state of stress in the hopper, acc. to [19,110]: a - forces acting on an elementary layer of a solid, b - forces acting on a boundary element, c - limiting state in a boundary element represented by Mohr stress circle, acc. to Dąbrowski [19]

Po uwzględnieniu dodatkowo warunku równowagi sił działających na trójkątny element przyścienny (rys.3.11b) równanie (3.16) uprościmy do postaci:

$$\frac{dp_v}{dh} + \frac{U}{F} - \gamma = 0. \quad (3.17)$$

Zależność między polem przekroju F i obwodem U na dowolnej głębokości h a polem F_0 i obwodem U_0 u nasady leja wyraża się związkiem:

$$\frac{U}{F} = \frac{U_0}{F_0} \frac{H_1}{H_1 - h}. \quad (3.18)$$

Po wprowadzeniu parametru bezwymiarowego

$$A = \frac{\tau}{p_v} \frac{U_0 H_1}{F_0} \quad (3.19)$$

i rozwiązaniu równania różniczkowego dla warunku brzegowego $p_v = p_{vd}$, $h = 0$ otrzymuje się wzór naporu pionowego:

$$p_v = \frac{H_1}{1-A} (T^A - T) + p_{vd} T^A, \quad (3.20)$$

gdzie $T = \frac{H_1 - h}{H_1}$.

Gdy założymy, że występuje graniczna wartość naprężeń ścinających $\tau = \operatorname{tg} \phi_s \cdot p_h$ oraz, że stosunek $p_h/p_v = k$, wówczas iloraz τ/p_v we wzorze (3.19) będzie równy $k \operatorname{tg} \phi_s$.

Napór normalny p_h i styczny p_t wyznacza się przez rzutowanie sił działających na element trójkątny materiału sypkiego (rys.3.11b):

$$p_h = p_v (\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha + \frac{\tau}{p_v} \sin 2 \alpha), \quad (3.21)$$

$$p_t = p_v \left[\frac{1}{2} (1-k) \sin 2 \alpha - \frac{\tau}{p_v} \cos 2 \alpha \right]. \quad (3.22)$$

Na podstawie zależności geometrycznych między naprężeniami w kole Mohra (rys.3.11c) Dąbrowski [19] wyznaczył zależność między współczynnikiem naporu k a naprężeniem stycznym τ w następującej postaci:

$$k \geq \frac{1 + \sin^2 \phi_u - 2 \sqrt{\sin^2 \phi_u - \left(\frac{\tau}{p_h}\right)^2 \cos^2 \phi_u}}{\cos^2 \phi_u + 4 \left(\frac{\tau}{p_h}\right)^2}. \quad (3.23)$$

Po podstawieniu do wzoru (3.23) $\tau = 0$ lub $\tau/p_h = \operatorname{tg} \phi_u$ otrzymamy minimalne i maksymalne wartości współczynnika naporu:

$$k' = \frac{1 - \sin \phi_u}{1 + \sin \phi_u} = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - 0,5 \phi_u), \quad (3.24)$$

$$k'' = \frac{1 - \sin^2 \phi_u}{1 + \sin^2 \phi_u} = \frac{1}{1 + 2 \operatorname{tg}^2 \phi_u}. \quad (3.25)$$

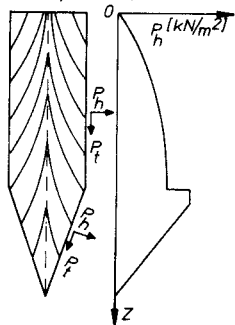
Rozwiązanie Nowackiego i Dąbrowskiego obejmuje jedynie stan napełniania silosu. W celu wyznaczenia naporu materiału sypkiego w leju podczas opróżniania należy do wzorów (3.21) i (3.22) stosować współczynniki uzyskane na podstawie badań doświadczalnych. Obszerna analiza rozkładu naporu w leju, opierająca się na propozycjach autorów krajowych, została przeprowadzona w pracy [12].

Teoretyczne rozwiązania zagadnienia naporu w leju podczas opróżniania silosu można znaleźć m.in. w pracach [24,94,163].

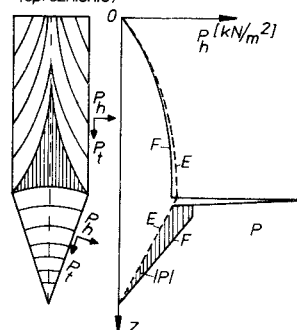
Opierając się na uproszczonym modelu ciała idealnie plastycznego Jenike i in. [58,59] założyli, że po napełnieniu silosu w materiale sypkim panuje czynny stan naprężeń, który odpowiada wstępnemu obciążeniu silosu (initial loading). Na początku procesu opróżniania pojawia się w dolnej części silosu bierny stan naprężeń. Na granicy czynnego i biernego stanu działa skoncentrowany napór materiału sypkiego (tzw. switch loading) o wartości znacznie przekraczającej obciążenie wstępne.

a) Silos z przepływem masowym

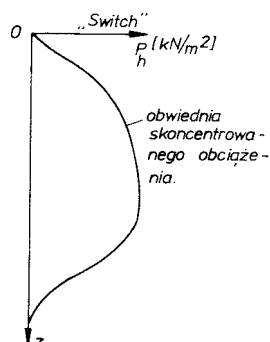
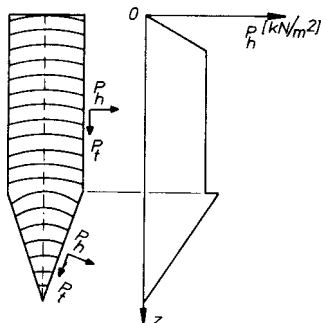
- obciążenie początkowe (napężnienie)



- obciążenie (opróżnienie) przetężenia



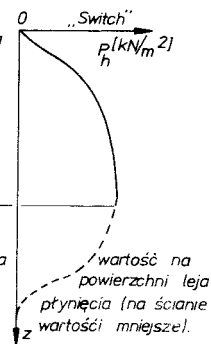
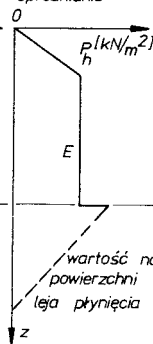
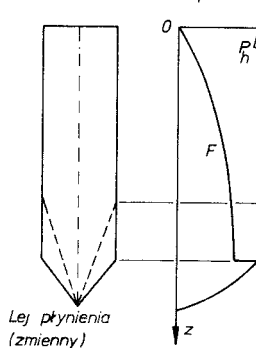
- obciążenie płynące - (opróżnienie)



b) Silos z przepływem rdzeniowym

napężnienie

opróżnianie



Rys.3.12. Schematy trajektorii naprężeń głównych i wykresy naporu materiału sypkiego wg Jenikego

Fig.3.12. Trajectories of principal stresses and diagrams of solid pressure, acc. to Jenike

Usytuowanie punktu działania skoncentrowanego naporu zależy od obrazu przepływu materiału sypkiego. Podczas przepływu masowego, przy którym cały materiał sypki znajduje się w ruchu, skoncentrowane obciążenie pojawia się w pobliżu otworu wysypowego. Podczas zaś przepływu rdzenio-owego, przy którym w dolnej części silosu występują nieruchome strefy materiału sypkiego, skoncentrowany napór działa na ścianach komory.

Kontynuowanie procesu opróżniania według Jenikego prowadzi do rozszerzenia się obszaru działania naporu biernego na coraz większą część komory, w związku z czym skoncentrowane obciążenie (switch) przemieszcza się w górę silosu. Gdy bierny stan naporu powstanie w całej komorze silosu, występuje tzw. obciążenie płynięcia (flow loading). Schematy trajektorii głównych naprężeń oraz wykresy naporu według teorii Jenikego przedstawione na rys.3.12.

Znaczny wkład w rozwój metod wyznaczania naporu w silosach wnoszą autorzy polscy, m.in. Mróz, Szymański, Drescher i Zawidzki [24,95,96,97,165]. Na podstawie teorii płynięcia plastycznego wymienieni autorzy podali wiele interesujących rozwiązań określania naporu materiału sypkiego, zarówno w kanałach zbieżnych, jak i w zbiornikach typu walcowego.

Ponieważ po napełnieniu silosu w materiale sypkim panuje sprężysty stan naprężeń, podejmowane są próby opracowania metod wyznaczania naporu opartych na teorii sprężystości. Z uwagi jednak na trudności związane z określeniem praw materiałowych panujących w stanie sprężystym, liczba propozycji w tym zakresie jest niewielka. Przykładem takich rozwiązań są prace Hartmanna [45] i Wolкера [163].

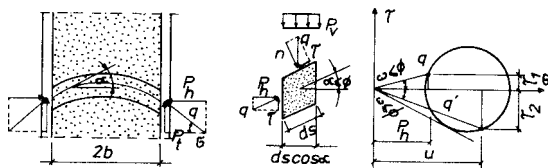
Hartmann wykorzystując rozwiązanie Janssena założył, że podczas napełniania cały materiał sypki w silosie znajduje się w sprężystym stanie naprężeń, a jedynie bezpośrednio przy ścianie występuje stan plastyczny. Wówczas ściana silosu pokrywa się z powierzchnią poślizgu, a kąt tarcia materiału o ścianę równy jest kątowi tarcia wewnętrznego. Iloraz naporu poziomego i pionowego przyjął on w postaci wyrażenia (3.25), wypro- wadzonego przez Dąbrowskiego [19].

Obliczone według wzorów Hartmanna wartości naporu są nieco większe od wartości wyznaczonych z teorii Janssena.

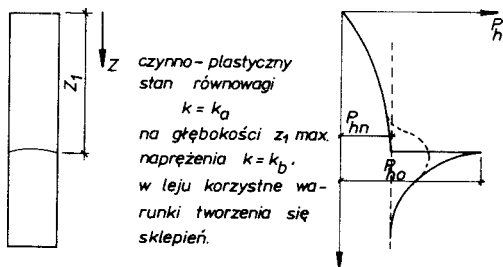
Rozwiązanie Wolкера obejmuje wyznaczenie naporu materiału sypkiego w leju silosu. Główne założenia dotyczące stanu naprężeń przyjął Wolker podobne jak w rozwiązaniu Hartmanna.

Część prac poświęconych wyznaczaniu naporu w silosach opiera się na hipotezie tworzenia się sklepień w materiale sypkim. Na podstawie tej hipotezy zakłada się, że w trakcie napełniania silosu linie oddziaływań cząstek materiału sypkiego mają kształt sklepień. Podczas opróżniania rozważane mogą być przypadki ścięcia sklepień wzdłuż ściany silosu, lub też całkowitego ich burzenia i ponownego odbudowywania.

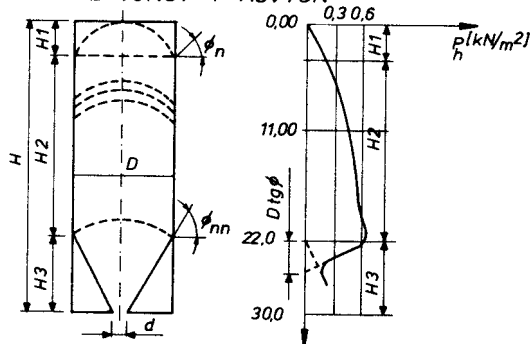
CAQUOT



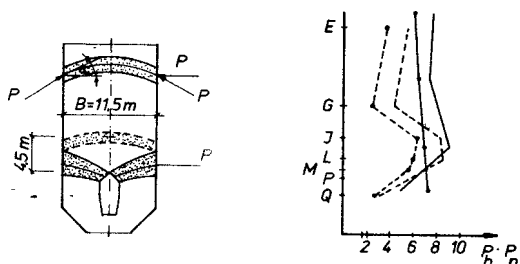
NANINGA



PLATONOV I KOVTUN



NOTHDURFT



Rys. 3.13. Schematy sklepień materiału sypkiego i wykresy naporu działającego na ściany silosu wg różnych autorów
Fig. 3.13. Pressure archs of a solid and the curves of pressures acting on the walls of a silo, acc. to different authors

Caquot [16,17] przyjął, że obciążenia w materiale sypkim przekazywane są na ściany silosu przez sklepienia paraboliczne (rys.3.13a). Wartości obciążeń zostały określone dzięki przyjęciu następujących założeń:

- obciążenie sklepienia p_v rozłożone jest równomiernie w przekroju silosu

- w sklepieniu panuje sprężysty stan naprężeń z wyjątkiem jego podparcia na ścianie silosu, gdzie występuje graniczny stan równowagi (napełnianie: czynno-plastyczny, opróżnianie: bierno-plastyczny)

- w trakcie opróżniania silosu sklepienie utworzone z materiału sypkiego ześlizguje się równomiernie po ścianie silosu

- opróżnianie silosu dokonywane jest jednocześnie przez otwory wysypowe rozmieszczone równomiernie wzdłuż obwodu ścian komory silosu.

Poziome obciążenie ścian silosu wyznacza Caquot z warunku równowagi sił. Iloraz naporu poziomego i pionowego otrzymał on w następującej postaci:

- napełnianie

$$k = \cos^2 \phi_s \frac{1 - \sin \phi_u \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_s}{\operatorname{tg}^2 \phi_u}}}{1 + \sin \phi_u \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_s}{\operatorname{tg}^2 \phi_u}}} \quad (3.26)$$

- opróżnianie

$$k = \cos^2 \phi_s \frac{1 + \sin \phi_u \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_s}{\operatorname{tg}^2 \phi_u}}}{1 - \sin \phi_u \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_s}{\operatorname{tg}^2 \phi_u}}} \quad (3.27)$$

Dla stanu napełniania wartości naporu poziomego według Caquota są większe w górnej części silosu od wartości uzyskanych ze wzorów Janssena. Podczas opróżniania silosu został uwzględniony wpływ szorstkości ścian silosu. Dla $\phi_s = \phi_u$, tzn. dla bardzo szorskich ścian, wartości naporu opróżniania są równe wartościom obliczonym dla stanu napełniania silosu. Wzrost wartości naporu opróżniania występuje w silosach ze ścianami o mniejszej szorstkości, tzn. gdy $\phi_s < \phi_u$.

W komorach opróżnianych przez otwór usytuowany symetrycznie Caquot przyjmuje iloraz $k = \operatorname{tg}^2 (45^\circ + 0,5 \phi_u)$ i uzyskuje następujące wyrażenie określające napór poziomy:

$$p_h = \gamma \left\{ (h_1 - h) + \frac{r}{ck - 2} \left[1 - \left(\frac{r}{h} \right)^{ck-2} \right] \right\} \frac{1 + \cos 2\beta \sin \phi_u}{1 - \sin \phi_u}, \quad (3.28)$$

gdzie oznaczenia wg rys.3.13,

$c = 1$ silos z komorą w kształcie wydłużonego prostokąta,

$c = 2$ silos z komorą okrągłą.

Punktem wyjścia rozwiązania Naningi [106] jest założenie, że tworzące się sklepienie w materiale sypkim powoduje zatrzymanie się procesu opróżniania (rys.3.13b).

W miejscu występowania sklepienia napór poziomy wzrasta skokowo do wartości:

$$p_h = \frac{\operatorname{tg}^2 (45^\circ + 0,5 \phi_u)}{\operatorname{tg} (45^\circ - 0,5 \phi_u)} \frac{\gamma r_h}{\operatorname{tg} \phi_s}. \quad (3.29)$$

Ponieważ jednak przejście z czynnego do biernego stanu naprężeń nie odbywa się natychmiastowo, więc wartości naporu będą znacznie mniejsze aniżeli wynika to z wyrażenia (3.29). Rzeczywisty przebieg wykresu naporu według Naningi zaznaczono na rys.3.13b linią przerywaną.

Platonov i Kovtun [130] wyznaczają trzy strefy komory silosu, w których występują odmienne wartości naporu (rys.3.13c). W strefie pierwszej (H_1) zaproponowano obliczenia naporu materiału sypkiego ze wzorów stosowanych do ścian oporowych:

$$p_h = \xi \gamma z \operatorname{tg}^2 (45^\circ - 0,5 \phi_u), \quad (3.30)$$

$$p_v = \gamma z, \quad (3.31)$$

gdzie ξ - współczynnik rozkładu naporu (np. w silosach na zboże dla komór o średnicy do 6,0 m $\xi = 1,65$).

W strefie drugiej o wysokości H_2 wartości naporu wyznacza się na podstawie równowagi sił w sklepieniu utworzonym w materiale sypkim:

$$p_h = 0,5 \gamma D \operatorname{tg} \phi_u, \quad (3.32)$$

$$p_v = \gamma z (1 - 2 \mu \operatorname{tg} \phi_u \operatorname{tg} \phi_s), \quad (3.33)$$

gdzie μ - współczynnik wytrzymałości sklepienia (np. dla zboża: $\mu = 0,15 + 0,05 (z/D)K$). (3.34)

W strefie trzeciej napór materiału sypkiego oblicza się ze wzorów (3.19) i (3.20), przy czym na przejściu ze strefy drugiej przyjmuje się występowanie ostatniego sklepienia, przenoszącego obciążenia bezpośrednio na ściany komory. Założenie to prowadzi do wystąpienia lokalnego wzrostu wartości naporu poziomego.

Nothdurft [109] podał rozwiązanie obejmujące obliczanie naporu materiału sypkiego w silosach z wbudowanymi wewnątrz komór elementami konstrukcyjnymi. Dla odciążających belek (rys.3.13d) przyjął on, że między belką a ścianą silosu tworzą się połówki sklepień. Powyżej poziomu belki w odległości 3-4 m tworzą się pełne sklepienia. Przy tych założeniach uzyskuje się maksymalne wartości naporu w miejscach działania półsklepień i sklepień pełnych. Między tymi sklepieniami występują natomiast obszary zmniejszonych wartości naporu.

Wiele rozwiązań opartych na hipotezie sklepień obejmuje strefę leżąca silosu. Przykładem takiego rozwiązania jest praca Forta [33], który określa kryteria tworzenia się sklepień nad otworami wysypowymi i z równowagi sił wyznacza działające w leju obciążenia.

Coraz częściej zagadnienie obliczania naporu materiałów sypkich w silosach opiera się na podejściu dyskretnym. Przykładem takiego rozwiązania jest praca Butterfielda [15], który badał płaski stan naprężeń w komorze silosu wypełnionej idealnym materiałem sypkim. Materiał ten składał się z cylindrycznych krążków ułożonych w regularne struktury. Dla różnych układów struktur Butterfield ułożył równania naprężeń pionowych i poziomych. Wykazał on, że współczynnik tarcia materiału sypkiego o ścianę i zdefiniowany dodatkowo współczynnik sklepienia wykazują największy wpływ na zmianę wartości naprężeń. Przedstawione przez Butterfielda przykłady obliczeń wykazały bardzo dobrą zgodność z wynikami jego badań eksperymentalnych. Ponieważ nie udało mu się jednak sformułować ogólnie ważnej funkcji zmiany wartości współczynnika sklepienia, trudno propozycję tę zastosować do celów praktycznych.

W 1983 r. ukazała się w Polsce monografia Dreschera [24] poświęcona zagadnieniom teoretycznego wyznaczania naporu materiałów sypkich w silosach. Obejmuje ona w większości wyniki badań uzyskane przez pracowników Zakładu Mechaniki Ośrodków Ciągłych i Zakładu Teorii Konstrukcji IPPT PAN.

Drescher przedstawia uproszczone metody obliczeń naporu materiału sypkiego na ściany i dna różnych zbiorników zakładając, że występuje w nich przepływ quasi-statyczny, dynamiczny ustalony lub dynamiczny nieustalony. Rozwiązania te wykorzystane są również w zagadnieniach kształtowania geometrii zbiorników zapewniających swobodny wypływ grawitacyjny.

Wyznaczenie naporu w przepływie quasi-statycznym jest oparte na uproszczonym modelu ciała idealnie plastycznego. Założenie występowania tego rodzaju przepływu umożliwia pominięcie sił bezwładności cząstek materiału sypkiego spowodowanych przyspieszeniami, jakich mogą one doznawać podczas ruchu. Ze względu na łatwe zastosowanie w praktyce inżynierskiej i dobrą zgodność z doświadczeniem takie podejście zostanie omówione szerzej.

Na podstawie identycznych założeń przyjętych przez Janssena rozpatruje Drescher warunki równowagi elementarnej warstwy materiału sypkiego o kształcie płaskim lub kołowym. Dla płaskiej warstwy otrzymuje on następujące różniczkowe równanie równowagi:

$$\frac{dp_v}{dz} + \frac{mM}{R} p_v - \gamma = 0, \quad (3.35)$$

gdzie

$m = 1$ dla kanału płaskiego,

$m = 2$ dla kanału walcowego,

$M = k \operatorname{tg} \theta_s$.

Dla warunków brzegowych $z = 0 \rightarrow p_v = 0$ otrzymuje się wzór pionowego naporu w postaci z równania (3.35):

$$p_v = -\frac{\gamma R}{mM} \left(1 - e^{-\frac{mM}{R} z} \right). \quad (3.36)$$

Napór poziomy i styczny wyznaczyć można ze związków:

$$p_t = M p_v \quad (3.37)$$

oraz

$$p_t = p_h \operatorname{tg} \theta_s. \quad (3.38)$$

Dla kanału zbieżnego ku dołowi różniczkowe równanie równowagi jest następujące:

$$\frac{dp_v}{dz} + mN \frac{p_v}{z} + \gamma = 0, \quad (3.39)$$

gdzie $N = [1 - M(\operatorname{ctg} \theta_s + \operatorname{ctg} \theta)]$.

Z rozwiązania równania (3.39) otrzymuje się:

- dla górnej powierzchni obciążonej ($z = 0$, $p_v = p_v^0$), gdy $mN \neq -1$:

$$p_v = \frac{\gamma}{mN + 1} z + \left(p_v^0 + \frac{\gamma H_1}{mN + 1} \right) \left(\frac{H_1}{z} \right)^{mN} \quad (3.40)$$

- dla górnej powierzchni nieobciążonej ($z = 0$, $p_v = 0$), gdy $mN \neq -1$:

$$p_v = \frac{\gamma}{mN + 1} z \left[-1 + \frac{H_1}{z}^{mN+1} \right]. \quad (3.41)$$

Dla $mN = -1$ otrzymuje się odpowiednio:

$$p_v = \left(\frac{p_v}{H_1} + \ln \frac{H_1}{z} \right) z \quad (3.42)$$

lub

$$p_v = z \ln \frac{H_1}{z}. \quad (3.43)$$

Napór na ścianach kanału zbieżnego określają związki:

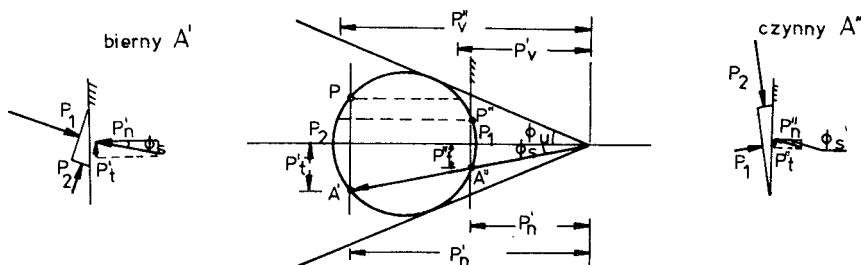
$$p_t = p_n \operatorname{tg} \phi_s \quad (3.44)$$

oraz

$$p_t = M p_v \quad (3.45)$$

Dla zbiornika złożonego z części równoległej i zbieżnej wyznaczenie naporu polega na łącznym wykorzystaniu wzorów (3.36) i (3.40) lub (3.36) i (3.42).

Istotą opisywanego rozwiązania jest powiązanie wartości stałej M ze stanem naprężeń, jaki może panować w materiale sypkim w różnych fazach operacji technologicznych (stan czynny - napełnianie, stan bierny - opróżnianie). Związki określające stałą M wyprowadzono w pracy Dreschera przy założeniu liniowej zależności warunku plastyczności Coulomba-Mohra, określonego efektywnym kątem tarcia wewnętrznego ϕ_u (rys.3.14).



Rys.3.14. Czynny i bierny stan naprężeń przedstawiony za pomocą koła Mohra [24]

Fig.3.14. Active and passive state of stress by Mohr stress circle [24]

Stała M wyznaczona została dla trzech przypadków uplastycznienia materiału sypkiego:

- a) przy ścianie zbiornika,
- b) w środku warstwy materiału sypkiego,
- c) przy ścianie zbiornika i w środku warstwy.

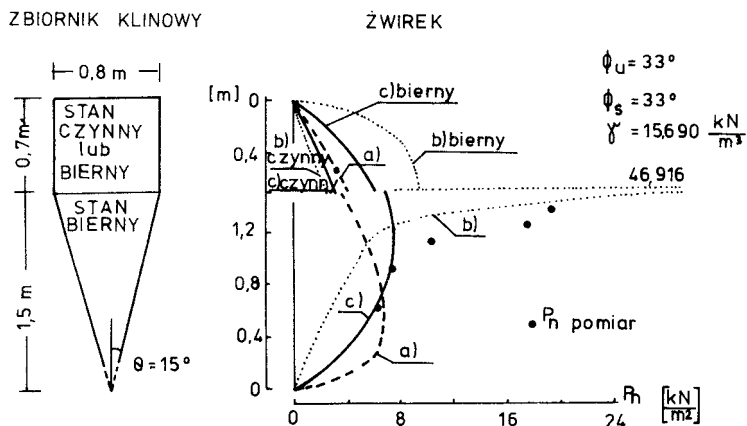
Hipotezę o uplastycznieniu elementu przy ścianie proponował m.in. Dąbrowski [19], Hartman [45] i Caquot [16,17], o uplastycznieniu w środku - Mróz i Szymański [97,153], a o uplastycznieniu przy ścianie i w środku - Walker [163]. Wzory do wyznaczenia stałej M w kanale równoległym i zbieżnym zestawiono w tab.3.1.

Porównując wyniki obliczeń z pomiarami przeprowadzonymi przez Borcza i in. [8,9] oraz Walkera [163] wykazał Drescher dobrą zgodność teorii

Wartości stałej M według Dreschera

Rodzaj kanału	Przypadek uplastycznienia	Wartość stałej M w zależności od stanu naprężeń	
		czynny	bierny
równoległy	a	$\frac{\sin \phi_u \sin \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s \right]}{1 + \sin \phi_u \cos \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s \right]}$	$\frac{\sin \phi_u \sin \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s \right]}{1 - \sin \phi_u \cos \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s \right]}$
	b	$\frac{1 - \sin \phi_u}{1 + \sin \phi_u} \operatorname{tg} \phi_s$	$\frac{1 + \sin \phi_u}{1 - \sin \phi_u} \operatorname{tg} \phi_s$
	c	$\frac{1 - \sin \phi_u}{\operatorname{ctg} \phi_s + (1 - \sin \phi_u) \operatorname{ctg} \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s \right]}$	$\frac{1 + \sin \phi_u}{\operatorname{ctg} \phi_s - (1 + \sin \phi_u) \operatorname{ctg} \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s \right]}$
zbieżny	a	$\frac{\sin \phi_u \sin \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s \right]}{1 + \sin \phi_u \cos \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s - \theta \right]}$	$\frac{\sin \phi_u \sin \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s \right]}{1 - \sin \phi_u \cos \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s + 2\theta \right]}$
	b	$\frac{\sin \phi_u}{1 + \sin \phi_u} \cdot \frac{\sin \left[\arcsin \operatorname{tg} \frac{\sin \phi_s \cos (2\theta - \phi_s)}{\sin \phi_u - \sin \phi_s \sin (2\theta + \phi_s)} - \phi_s \right]}{\cos \left[\arcsin \operatorname{tg} \frac{\sin \phi_s \cos (2\theta - \phi_s)}{\sin \phi_u - \sin \phi_s \sin (2\theta + \phi_s)} - \phi_s - 2\theta \right]}$	$\frac{\sin \phi_u}{1 - \sin \phi_u} \cdot \frac{\sin \left[\arcsin \operatorname{tg} \frac{\sin \phi_s \cos (2\theta + \phi_s)}{\sin \phi_u + \sin \phi_s \sin (2\theta + \phi_s)} + \phi_s \right]}{\cos \left[\arcsin \operatorname{tg} \frac{\sin \phi_s \cos (2\theta + \phi_s)}{\sin \phi_u + \sin \phi_s \sin (2\theta + \phi_s)} + \phi_s + 2\theta \right]}$
	c	$\frac{(1 - \sin \phi_u) \sin \phi_u \sin \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s \right]}{1 - \sin^2 \phi_u \cos \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} - \phi_s - 2\theta \right]}$	$\frac{(1 + \sin \phi_u) \sin \phi_u \sin \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s \right]}{1 - \sin^2 \phi_u \cos \left[\arcsin \frac{\sin \phi_s}{\sin \phi_u} + \phi_s + 2\theta \right]}$

z doświadczeniem pod warunkiem, że przyjmie się w różnych częściach zbiornika odpowiednie hipotezy uplastycznienia materiału sypkiego. Na rysunku 3.15 przedstawiono przykładowe porównanie wyników obliczeń z pomiarami [8].



Rys.3.15. Przykład porównania obliczeń Dreschera [24] z wynikami pomiarów Borcza i in. [8]

Fig.3.15. Comparison of results by Drescher [24] and by Borcz et al. [8]

Z rysunku tego wynika, że najlepszą zgodność z wynikami doświadczenia w części równoległej zbiornika daje przyjęcie hipotezy uplastycznienia a, prowadzące wobec równości $\phi_u = \phi_s$ do identycznego rozkładu naporu w stanie czynnym i biernym. W części zbieżnej natomiast najlepsza zgodność występuje wskutek przyjęcia uplastycznienia b.

Rozwiązanie zagadnień naporu w ustalonym lub nieustalonym przepływie polega na uwzględnieniu sił bezwładności przez powiązanie stanu naprężeń z kinematyką przepływu materiału sypkiego. Uwzględnienie sił bezwładności w metodzie uproszczonej zaproponowali Mróz i Szymański [97].

W przepływie ustalonym zakłada się, że pole prędkości cząstek materiału sypkiego może być funkcją tylko ich położenia w zbiorniku (niezależnie od czasu). Rozwiązanie zagadnienia naporu w przepływie nieustalonym natomiast obejmuje przypadek zmiennego w czasie pola prędkości i po raz pierwszy zostało podane w pracy Wol-Gajewskiej [164].

Ze względu na to, że w zbiorniku równoległym cząsteczki materiału sypkiego w przepływie ustalonym - jak wykazują doświadczenia - są stałe wzdłuż wysokości silosu, napór w takim zbiorniku można wyznaczać jak dla przepływu quasi-statycznego. W kanale zbieżnym zaś prędkości cząstek są radialne i skierowane ku wierzchołkowi kanału. Po wyznaczeniu pola przyspieszeń, a więc i sił bezwładności, można wprowadzić te siły do równań równowagi sił działających na elementarną warstwę materiału syp-

kiego. Przyjmując dodatkowo założenia Janssena otrzyma się dla kanału zbieżnego następujące równanie [19]:

$$\frac{dp_v}{dz} + mN \frac{p_v}{z} + \gamma - \frac{D_m L \rho}{z^{2m+1}} = 0, \quad (3.46)$$

gdzie

$$L = \frac{1}{3-m} [\cos^2 \theta + (2-m) \theta \operatorname{ctg} \theta + (m-1) \cos^4 \theta, \\ N = [1 - M (\operatorname{ctg} \theta_s - \operatorname{ctg} \theta)],$$

D_m - stała zależna od prędkości cząsteczek.

Rozwiązaniem tego równania jest:

- dla $mN \neq -1$

$$p_v = D_m L \rho \frac{z^{-2m}}{m(N-z)} - \gamma \frac{z}{mN+1} + \frac{C}{z^{mN}} \quad (3.47)$$

- dla $mN = -1$

$$p_v = -D_m L \rho \frac{z^{-2m}}{1+2m} - z \ln z + C, \quad (3.48)$$

gdzie

C - stała całkowania wyznaczana dla założonych warunków brzegowych,

$m = 1$ dla kanału płaskiego,

$m = 2$ dla kanału walcowego.

W przepływie ustalonym różniczkowe równania równowagi i ich ogólne rozwiązania przyjmują postać:

- dla kanału równoległego

$$\frac{dp_v}{dz} + \frac{mM}{R} p_v - \gamma + \rho \frac{d^2 h}{dt^2} = 0, \quad (3.49)$$

skąd

$$p_v = e^{-\frac{mM}{R} z} \left[\frac{z}{mM} \left(\gamma - \rho \frac{d^2 h}{dt^2} \right) \right] e^{\frac{mM}{R} z} + C, \quad (3.50)$$

gdzie $\frac{d^2 h}{dt^2}$ - związek wyrażający przyspieszenia cząstek materiału sypkiego

- dla kanału zbieżnego we współrzędnych biegunowych:

$$\frac{dp_{vr}}{dr} + mM \frac{p_{vr}}{r} + \gamma K - \frac{\rho m}{r} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \left[\left(\frac{r}{r} \right)^{m-1} - \left(\frac{r}{r} \right)^{2m} \right] - \\ - \rho \left(\frac{r}{r} \right)^m \frac{d^2 r}{dt^2} = 0, \quad (3.51)$$

skąd

$$p_{vr} = \frac{\rho r^{1-m}}{m(N-1)+1} \left[m r_z^{m-1} \left(\frac{dr_z}{dt} \right)^2 + r_z^m \frac{d^2 r_z}{dt^2} - \right. \\ \left. - \frac{\rho r_z^{2m} r^{-2m}}{N-2} \left(\frac{dr_z}{dt} \right)^2 - \frac{\gamma Kr}{mN+1} + Cr^{-mN} \right], \quad (3.52)$$

gdzie $K = (2-m) \frac{\theta}{\sin \theta} - (1-m) \frac{2}{1+\cos \theta}$, pozostałe oznaczenia j.w.

Drescher w wyniku analizy obu rozwiązań wykazał, że do celów praktycznych można rzeczywisty proces nieustalony wypływu aproksymować sekwencją stanów ustalonych. Jest to możliwe dzięki temu, że napór materiału sypkiego w początkowym okresie wypływu, obliczony dla stanu ustalonego, jest wyższy od naporu w stanie nieustalonym. Dla zaawansowanego wypływu rozbieżność wartości naporu w obydwu stanach całkowicie zanika.

3.5. Uwagi i wnioski

Liczne próby teoretycznego ujęcia mechaniki procesów zachodzących w silosach w materiale sypkim nie są dotychczas stosowane zbyt często w praktyce. Spowodowane to jest m.in. tym, że nie opracowano do tej pory uniwersalnego rozwiązania uwzględniającego wszystkie wpływy decydujące o wartości naporu materiału sypkiego w silosach. W obliczeniach naporu w silosach najchętniej stosowana jest metoda Janssena, która z dostateczną dokładnością uwzględnia stan napełnienia komory. Wiele innych bardziej skomplikowanych rozwiązań prowadzi do wyników jedynie nieznacznie odbiegających od metody Janssena.

Oceny różnic w wartościach naporu wyznaczonego według różnych rozwiązań teoretycznych dokonali Hancock i Nederman [41]. W tym celu wykorzystali oni następujące metody: Janssena, Walkera, Airego oraz własne obliczenia zawierające rozwiązanie różniczkowych równań Sokołowskiego.

Wyniki obliczeń dla stanu napełniania silosu wykazały, że maksymalne różnice wartości naporu poziomego nie przekraczały 5%. Wartości naporu pionowego zaś, wyznaczone na podstawie wymienionych metod, nie różniły się między sobą więcej aniżeli o 12%.

Obliczenie naporu materiału sypkiego podczas opróżniania komory opiera się na założeniu bierno-plastycznego stanu naprężeń. Przyjęcie tego stanu umożliwia uwzględnienie wzrostu naporu poziomego działającego na ściany silosu. Dyskusyjna jest jednak ocena wielkości tego wzrostu. Eksperymentalne wyniki pomiarów wykazały, że wartość tego wzrostu wynosić może od 10 do 400% i zależy od czynników wymienionych w p.3.1. Ponieważ uwzględnienie wszystkich tych czynników w rozwiązaniach teoretycz-

nych jest praktycznie niemożliwe, przeto bardzo często wyznaczenie naporu opróżniania opiera się obecnie na wynikach badań eksperymentalnych.

Wiele opracowanych dotychczas rozwiązań zagadnienia naporu materiału sypkiego daje rozbieżne rezultaty. Wynika to z tego, że rozwiązania te opisują jedynie pojedyncze przypadki wyników badań eksperymentalnych.

Duże nadzieje należy wiązać z opracowanymi uproszczonymi metodami wyznaczania naporu w zbiornikach, przedstawionymi w pracy [24]. Dzięki wprowadzeniu w nich różnych hipotez uplastycznienia rozwiązania te obejmują różne przypadki napełniania i opróżniania silosów.

Wdrażaniu tych rozwiązań do praktyki powinny towarzyszyć badania doświadczalne.

4. BADANIA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW KONSTRUKCJI SILOSÓW I WARUNKÓW ICH EKSPLOATACJI NA WARTOŚĆ I ROZKŁAD NAPORU MATERIAŁU SYPKIEGO

4.1. Wstęp

Wartość i rozkład naporu materiału sypkiego ściśle związane są z parametrami konstrukcji komór silosów i z warunkami ich eksploatacji.

Na wartość i rozkład naporu podczas napełniania wpływ będą mieć: smukłość komór, kształt ścian i dna, szorstkość wewnętrznych powierzchni ścian, sposób napełniania komór oraz odkształcalność konstrukcji silosów.

Podczas opróżniania wartość i rozkład naporu poziomego zależą od rodzaju przepływu materiału sypkiego. Na rodzaj przepływu, oprócz wymienionych czynników, dodatkowy wpływ ma sposób napełniania i opróżniania komór oraz intensywność opróżniania silosu.

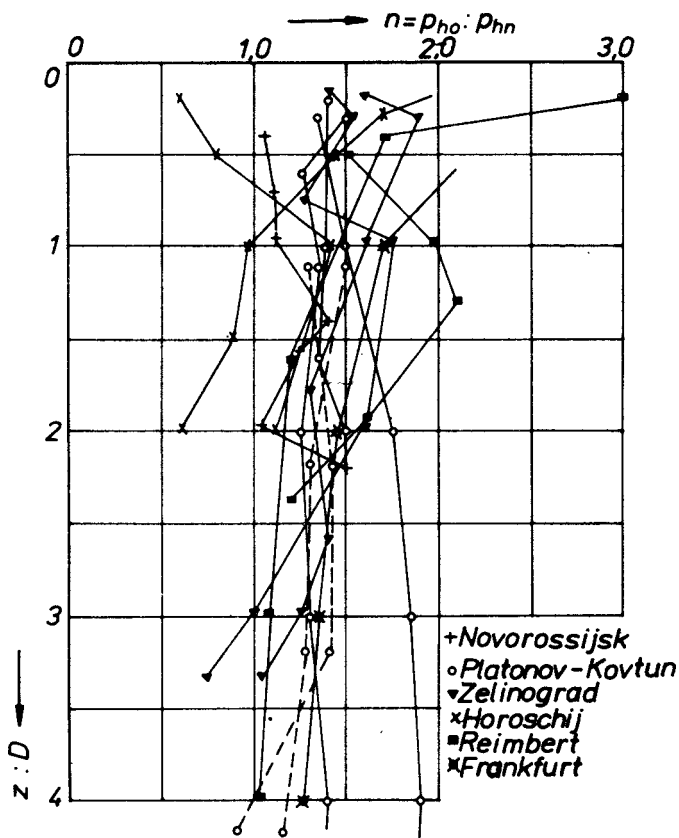
Na podstawie dotychczasowych wyników badań w wielu przypadkach możliwa jest tylko jakościowa ocena niektórych parametrów. Określenie wpływu ilościowego większości wymienionych czynników wymaga prowadzenia dodatkowych badań eksperymentalnych i teoretycznych.

4.2. Smukłość komór

4.2.1. Analiza dotychczasowych wyników wybranych badań

Ocena wpływu smukłości komory silosu na wartość i rozkład naporu poziomego jest znacznie utrudniona, ponieważ badania eksperymentalne prowadzone są na obiektach często różniącymi się wzajemnie od siebie pozostałymi czynnikami wpływu wymienionymi w p. 4.1.

Zestawienie wyników pomiarów naporu na obiektach w skali naturalnej, przedstawione za Oroszem na rys. 4.1, potwierdza występujące różnice w



Rys.4.1. Porównanie wykresów współczynników zmiany wartości naporu poziomego zboża podczas opróżniania silosów o różnej smukłości komór

Fig.4.1. Comparison of the coefficients of corn horizontal pressure during discharging of the silos of different slenderness ratio

wartościach wzrostu naporu poziomego podczas opróżniania komór różnych silosów nawet o zbliżonych smukłościach.

Przykład różnic występujących we wzroście naporu poziomego w silosach o identycznej smukłości komór przedstawione w pracy [113]. Wymiary badanych silosów wynosiły: średnice - 6 m, wysokość - 30 m (smukłość $H : r_h = 20$). Komory różniły się szorstkością wewnętrznych powierzchni ścian i sztywnością ścian. Obliczone wartości współczynnika zmian naporu podczas opróżniania, przy jednakowych poziomach zboża ponad czujnikiem (12 m), wynosiły:

- silos nr 25 - ściany gładkie, komora wewnętrzna:

$p_{ho} : p_{hn} = 2,92$ (komory sąsiednie napełnione),

- $P_{ho} : P_{hn} = 1,68$ (komory sąsiednie puste),
 - silos nr 323 - ściany uźebrowane, komora zewnętrzna:
 $P_{ho} : P_{hn} = 1,90$,
 - silos nr 121 - ściany gładkie, komora zewnętrzna:
 $P_{ho} : P_{hn} = 1,69$,
 - silos nr 315 - ściany uźebrowane, prefabrykowana komora ośmiokątna:
 $P_{ho} : P_{hn} = 1,44$.

Największe wartości wzrostu wartości współczynnika zmian naporu poziomego podczas opróżniania wystąpiły w komorze silosu o największej sztywności z gładkimi ścianami (komora wewnętrzna przy napełnionych komorach sąsiednich), najniższe zaś w silosie z komorą uźebrowaną o małej sztywności ścian (prefabrykowana komora ośmiokątna).

T a b e l a 4.1

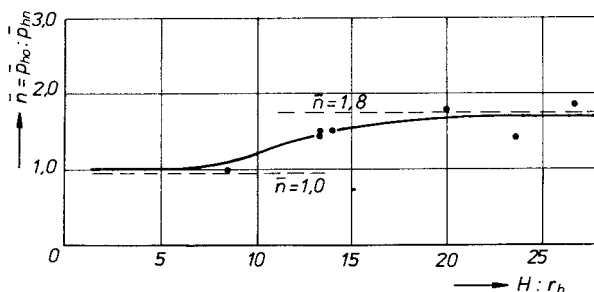
Wartości współczynnika zmiany naporu poziomego zboża podczas opróżniania żelbetowych komór silosów w skali naturalnej

Rok	Autor lub miejscowość	Wymiary silosu		Smukłość komory $H:r_h$	Wartości współczynnika zmiany naporu poziomego		Miejsce występowania maksymalnego wzrostu naporu (od poziomu dna)
		r_h (m)	H (m)		n_{max}	$\bar{n}$ wzdłuż wysokości	
1938	Baku [112]	1,75	28,2	16,1	2,33	1,40	8,5 r_h
1959	Platonov, Kovtun [130]	0,925	22,0	23,8	1,60	1,42	6,5 r_h
		1,25	17,5	14,0	1,70	1,50	11,6 r_h
		1,50	40,0	26,7	1,90	1,85	6,7 r_h
1975	Platonov i in. [133]	1,50	30,0	20	2,27	1,82	10 r_h
1980	Kamiński, Zubrzycki [64]	2,00	26,8	13,4	1,80	1,51	7,4 r_h
1980	Henny i in. [46]	3,81	32,0	8,4	1,0	1,0	-
1983	Kamiński Zubrzycki [70]	2,25	30,0	13,3	3,08	1,45	2,7 r_h

Opisane przykłady porównań świadczą o tym, że wpływ smukłości komór można analizować uwzględniając obiekty wykonane z materiałów konstrukcyjnych zapewniających jednakową sztywność tych komór oraz identyczną szorstkość wewnętrznych powierzchni ścian. W tabeli 4.1 zestawiono obliczone wartości współczynników zmiany naporu poziomego podczas opróżniania

żelbetowych silosów w skali naturalnej, spełniających w przybliżeniu te wymagania.

Na podstawie wyników badań zamieszczonych w tab.4.1 można wykazać, że w silosach o małej smukłości komór rejestrowany jest najmniejszy wzrost wartości naporu poziomego podczas opróżniania (np. w badaniach Henry'ego i in.). W silosach o komorach bardziej smukłych średnie wartości wzrostu naporu wynoszą od 40 do 85% w stosunku do naporu pomierzonego po napełnieniu silosu. Najwyższy średni wzrost naporu poziomego wystąpił w komorze o największej smukłości (badania Platonowa i Kowtuna). Na podstawie tych wyników badań niemożliwa jest jednak ocena wpływu smukłości komory na wartość maksymalnych wzrostów naporu poziomego. W komorach o średniej smukłości (Kamiński, Zubrzycki oraz Platonow i in.) wystąpił największy wzrost naporu, wynoszący 127-208%.

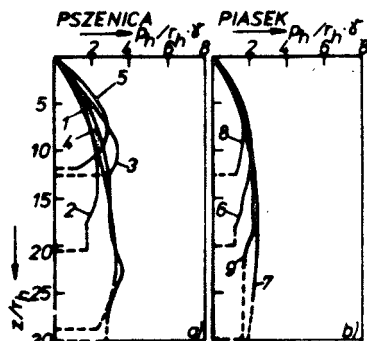


Rys.4.2. Wykres wpływu smukłości komory silosu na średnie wartości współczynnika zmiany naporu pszenicy w trakcie opróżniania silosu
Fig.4.2. The effect of the slenderness ratio of the chamber of a silo on the mean values of the coefficient of variations of wheat pressure during discharging of the silo

Sporządzony na podstawie tab.4.1 wykres wpływu smukłości z wykorzystaniem średnich wartości współczynnika zmiany naporu przedstawiono na rys.4.2. Otrzymany wykres jest krzywą posiadającą dwie asymptoty ($n = 1,0$ i $n = 1,8$).

Bardziej wyraźny jest wpływ smukłości uzyskany z badań modelowych. Na rysunku 4.3 porównano wykresy naporu pszenicy i piasku w modelach silosów o różnej smukłości komór. Aby możliwe było porównanie, wykresy te sporządzono w układzie współrzędnych bezwymiarowych. Na osi poziomej naniesiono wartości $p_h : r_h \gamma_0$, natomiast na osi pionowej przyjęto iloraz bezwymiarowy $z : r_h$. Linia przerywaną zaznaczono zakres smukłości badanych komór modeli silosów.

Zarówno w przypadku pszenicy, jak i piasku wraz ze zmniejszeniem się smukłości komory wartości naporu poziomego w dolnej strefie silosu są wyraźnie mniejsze. W najwyższych strefach silosu wartości naporu poziomego podczas opróżniania są wyższe w komorach mniej smukłych.



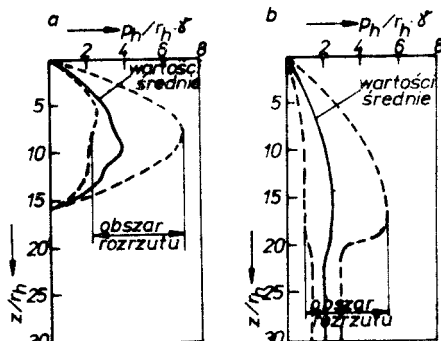
Rys.4.3. Porównanie wykresów naporu poziomego pszenicy i piasku działającego w trakcie opróżniania modeli silosów o różnych smukłościach komór: 1 - wg Piepera [124], 2 - wg Wenzela [162], 3 - wg Motzkusa [94], 4 - wg Wagnera [160], 5 - wg Kamińskiego i Zubrzyckiego [61], 6 - wg Wenzela [162], 7 - wg Wagnera [160], 8 - wg Motzkusa [94], 9 - wg Fresego [24]

Fig.4.3. Comparison of horizontal pressures for wheat and sand when discharging the model silos of different slenderness ratio: 1 - acc. to Pieper [124], 2 - acc. to Wenzel [162], 3 - acc. to Motzkus [94], 4 - acc. to Wagner [160], 5 - acc. to Kamiński and Zubrzycki [61], 6 - acc. to Wenzel [162], 7 - acc. to Wagner [160], 8 - acc. to Motzkus [94], 9 - acc. to Frese [34]

żej częstotliwości. Nie wiadomo, jakie wartości naporu poziomego przyjmowane są podczas sporządzania wykresu (średnie czy maksymalne). Aby podkreślić znaczenie tego problemu, na rys.4.4 przedstawiono wykresy obszarów rozrzutu wartości naporu piasku, uzyskane z badań dwóch różnych autorów.

W celu dokładnego określenia wpływu smukłości komór niezbędne jest prowadzenie badań silosów o identycznych kształtach komór i den. Ściany komór takich silosów muszą mieć również identyczne szorstkości. Wstępne badania w tym kierunku prowadzili Pankratowa i Nagałcew [87], wykorzystując dwa modele o jednakowej pojemności, wykonane z blachy aluminiowej. Smukłości komór były różne i wynosiły $H : D = 5$ oraz $H : D = 5/3$. Jako materiał obciążający zastosowano piasek ($\gamma_0 = 16,5 \text{ kN/m}^3$). Wyniki badań zamieszczono w tab.4.2.

Z zestawionych w tab.4.2 danych wynika, że w modelu silosu o smukłości $H : D = 5$ wzrost naporu poziomego piasku podczas opróżniania był znacznie większy, niżeli w modelu o smukłości mniejszej $H : D = 5/3$.



Rys.4.4. Obszary rozrzutu mierzonych wartości naporu poziomego piasku: a - badania Van Zantena, Mooij i Richardsa [142], b - badania Fresego [34]

Fig.4.4. Scatter bands of the measured values of sand horizontal pressure: a - by Van Zanten, Mooij and Richards [142], b - by Frese [34]

Trudności w ocenie wpływu smukłości komory wynikają m.in. również z tego, że autorzy publikowanych prac rzadko podają sposób obliczania wartości naporu materiału sypkiego. Procesowi opróżniania towarzyszą cykliczne zmiany naporu często o du-

T a b e l a 4.2

Wyniki badań naporu poziomego piasku w modelach silosów
o różnej smukłości komór

Poziom czujnika	Wartości naporu (N/m^2) i jego współczynnika zmiany					
	model H : D = 5			model H : D = 5/3		
	P_{hn}	P_{ho}	$P_{ho}:P_{hn}$	P_{hn}	P_{ho}	$P_{ho}:P_{hn}$
1	343,4	1271,9	3,70	318,0	712,3	2,23
2	301,0	1293,1	4,29	89,0	305,2	3,42
3	101,7	605,7	5,95	254,4	559,6	2,20
4	89,0	400,9	4,50	152,6	343,4	2,25

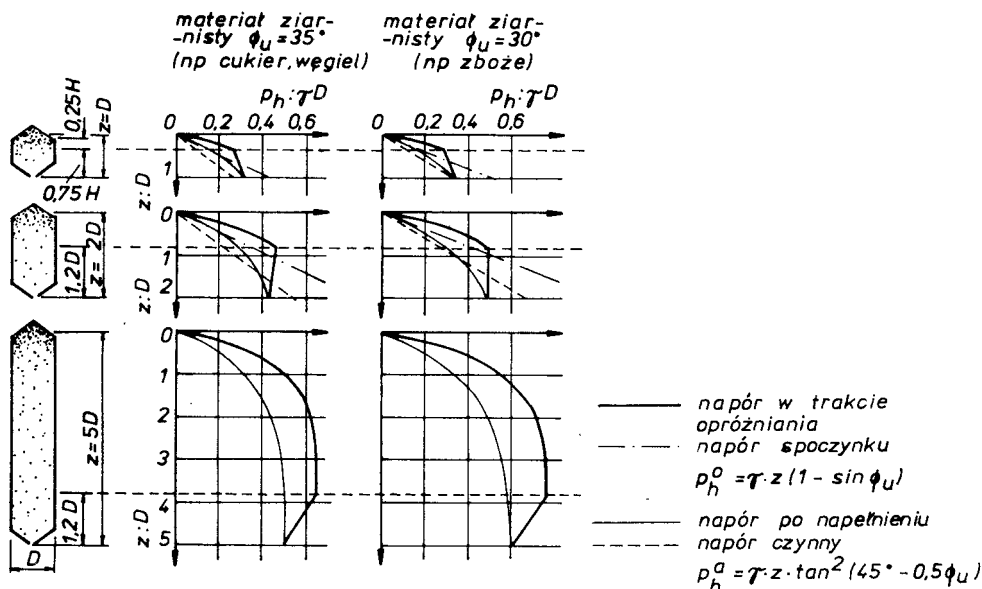
4.2.2. Wpływ smukłości komory silosu na napór materiału sypkiego w świetle aktualnych przepisów normowych

W normie DIN-1055 wpływ smukłości silosu uwzględniany jest w obliczaniu naporu materiału sypkiego, działającego podczas opróżniania. Na wysokości $1,2D$ lub $0,75H$ od dna komory wartości tego naporu zostają zmniejszone do wartości wyznaczonych dla stanu napełniania. Wynikający z tej normy obraz redukcji wartości naporu poziomego dla różnych smukłości komór w zależności od rodzaju materiału sypkiego przedstawiono na rys.4.5.

W projekcie nowej normy DIN-1055 [23] napór w trakcie opróżniania oblicza się mnożąc wartości naporu po napełnieniu silosu (napór Janssenowski) przez współczynnik e_h , którego wartość zależy od rodzaju materiału sypkiego. Współczynnik ten jest wartością stałą dla wszystkich silosów o smukłości komór $H : D \geq 1,5$. W projekcie tej normy odciążający wpływ dna uwzględnia się jedynie w silosach z płaskim dnem wypełnionych materiałami ziarnistymi (np. zbożem i piaskiem).

Wpływ smukłości komory uwzględnia się także w przypadku takich materiałów, jak kukurydza i cement, które w trakcie opróżniania silosu z przepływem rdzeniowym wywołują pulsację naporu. W komorach o smukłości $H : D \geq 2,0$ skutki pulsacji naporu równoważy się przez dodatkowe zwiększenie wartości naporu poziomego wzdłuż całej wysokości komory za pomocą współczynnika $c_s = 1 + 0,50 : \sqrt{a_r}$ (gdzie a_r - najmniejsza odległość otworu wysypowego od ściany komory w m).

Pełny wzrost wartości naporu poziomego występuje w silosach, których wysokość komory przekracza $1,5 D$. W silosach o wysokości $H \leq D$ wzrost wartości naporu poziomego nie występuje ($e_h = 1,0$). W silosach z komorami o wysokości $D < H < 1,50$ wartości współczynnika e_h , obrazującego wzrost wartości naporu, są przyjmowane w wyniku interpolacji liniowej.



Rys.4.5. Wpływ smukłości komory silosu na napór poziomy według DIN-1055 [21]

Fig.4.5. The effect of the slenderness ratio of the chamber of a silo on the horizontal pressure acc. to DIN-1055

Według amerykańskiej normy ACI-31377 [1] wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania oblicza się za pomocą tzw. współczynnika nadciśnienia. Wartości tych współczynników zależą od smukłości silosu i są różne wzdłuż wysokości komory (tab.4.3).

Dla niskich silosów ($H : D \leq 2$) amerykańska norma zaleca przyjmować współczynniki nadciśnienia, których maksymalne wartości w dolnej strefie silosu wynoszą aż 1,65. W silosach bardzo smukłych ($H : D \geq 4$) maksymalne wartości współczynnika nadciśnienia wynoszą 1,85. Zatem różnica w intensywności wzrostu naporu poziomego w trakcie opróżniania w niskich i wysokich silosach jest niewielka i wynosi około 20% (według projektu DIN 1055 różnica ta np. dla pszenicy wynosi 50%).

Poziome obciążenie ścian silosów według radzieckiej normy SN 261-77 [149] składa się z sumy trzech następujących składników naporu:

1. Napór rozłożony na całej powierzchni ściany komory (napór Janssenowski p_0),
2. Napór pierścieniowy rozłożony równomiernie na części wysokości silosu równej średnicy komory. Napór ten obliczany jest ze wzoru:

$$p_h = a_1 p_0. \quad (4.1)$$

T a b e l a 4.3

Wartości współczynnika nadciśnienia obrazującego wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania silosu według ACI 313-77

Wysokość strefy silosu (mierzona od górnej krawędzi komory)	Wartość współczynnika nadciśnienia c_d									
	H : D lub H : a					materiały sproszkowane z kohezją w silosach opróżnianych pneumatycznie (H:D lub H:a)				
	≤ 2	$= 3$		≥ 4		$= 4$		≥ 5		
	J	R	J	R	J	R	J	R	J	R
$H_1 = D \tan \phi_u$ lub $H_1 = a \tan \phi_u$	1,35	1,10	1,45	1,20	1,50	1,25	1,60	1,30	1,65	1,35
$0,25(H-H_1)$	1,55	1,45	1,65	1,55	1,75	1,60	1,80	1,70	1,79	1,75
$0,25(H-H_1)$	1,65	1,65	1,75	1,75	1,85	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00
$0,25(H-H_1)$	1,65	1,65	1,75	1,75	1,85	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00

Oznaczenia: J - metoda Janssena, R - metoda Reimberta.

3. Napór lokalny działający na dwóch płaszczyznach o powierzchni $D/12 \times D/12$, usytuowanych naprzeciw siebie w dowolnym położeniu na ścianach komory:

$$p_h = a_2 p_0 \quad (4.2)$$

Współczynniki a_1 i a_2 we wzorach (4.1) i (4.2) zależą od smukłości komory silosu wyrażonej ilorazem jej wysokości i średnicy. Wartości tych współczynników zamieszczono w tab.4.4.

T a b e l a 4.4

Wartości współczynników do obliczania wartości naporu pierścieniowego i lokalnego według SN-261-77

Współczynniki	Smukłość komory silosu H : D						
	10	5	2,5	1,67	1,25	0,83	0,625
a_1	1,8	1,5	1,2	0,9	0,70	0,50	0,30
a_2	1,25	1,00	0,50	0,25	0,12	0,06	0,03

Dla pośrednich wartości ilorazu H : D wartości współczynników a_1 i a_2 przyjmowane są w wyniku interpolacji liniowej. Według przepisów radzieckich wzrost naporu poziomego, wynikający z opróżniania silosu, występuje również w komorach o smukłości mniejszej niż 1,0. Różnica w in-

tensywności wzrostu naporu poziomego w silosach niskich i wysokich wynosi dla naporu pierścieniowego 150%, zaś dla naporu lokalnego - 122%.

Według polskiej normy [135] napór poziomy podczas opróżniania symetrycznego oblicza się ze wzoru:

$$p_{ho} = n_1 p_{hn} \quad (4.3)$$

Wartości współczynnika n_1 zależą od smukłości komory silosu i są one następujące:

- dla $H : r_h \leq 8$, $n_1 = 1,1$
- dla $H : r_h = 12$, $n_1 = 1,2$
- dla $H : r_h \geq 16$, $n_1 = 1,3$.

Dla smukłości zawartych między 8 i 12 oraz 12 i 16 wartości współczynnika n_1 określa się w wyniku interpolacji liniowej.

Omówione zasady obliczeń normowych wskazują na znaczne rozbieżności co do oceny wpływu smukłości komory silosu na wartości i rozkład naporu materiału sypkiego. Różnice w wartościach naporu np. między normą DIN-1055 [21] a ACI-31377 [1] są w niektórych przypadkach bardzo duże. W silosach o dużej smukłości komór sięgają one nawet do 100%. Fakt ten jeszcze mocniej potwierdza konieczność prowadzenia dalszych prac eksperymentalnych nad precyzyjną oceną wpływu smukłości komory na wartość oddziaływań materiału sypkiego.

4.2.3. Wyniki badań własnych

Badania prowadzono na trzech modelach cylindrycznych silosów z płaskim dnem, które zaprojektowano na podstawie wymiarów obiektów w skali naturalnej [63]. Geometryczne wymiary badanych modeli silosów zamieszczono w tab.4.5, a pionowy przekrój jednego z nich przedstawiono na rys.4.6.

T a b e l a 4.5

Geometryczne wymiary badanych modeli silosów

Nr modelu	Średnica komory, D (mm)	Wysokość komory, H (mm)	Smukłość komory $H:r_h$	Skala w stosunku do obiektu rzeczywistego
1	515	1015	7,9	1 : 40
2	740	1015	5,5	1 : 40
3	1040	1015	3,9	1 : 40

Celem badań było określenie wartości naporu cukru i pszenicy w trakcie napełniania i symetrycznego opróżniania modeli silosów o różnej smukłości komór.

Aby umożliwić pełną ocenę rozkładu naporu materiału sypkiego, założono konieczność wykonania pomiarów następujących obciążeń:

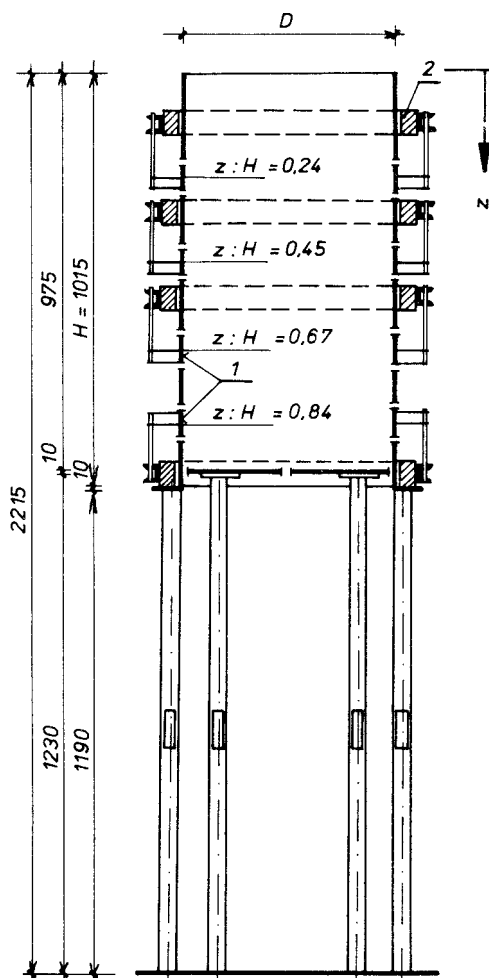
- naporu poziomego materiału sypkiego działającego na ściany modelu,
- towarzyszących naporowi poziomemu sił tarcia materiału sypkiego o ścianę komory,
- globalnego obciążenia pionowego dna,
- globalnego obciążenia pionowego ścian.

Do pomiaru wartości naporu poziomego i towarzyszących mu sił tarcia zastosowano czujniki, które są zmodyfikowaną wersją czujników Hierleina [47]. Widok czujnika przedstawiono na rys.4.7.

Zasadniczymi elementami czujnika są dwa stalowe płaskowniki, połączone z rurką zamocowaną sztywno w uchwycie o kształcie ceownika. Na końcu płaskowników znajduje się metalowa płytka, do której były przykręcane krzywoliniowe powierzchnie czynne czujników, dopasowane kształtem do komór modeli.

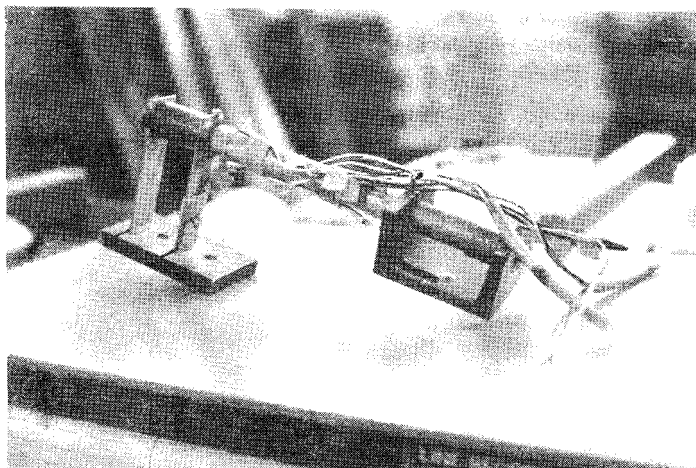
Czujniki umożliwiały pomiar naporu poziomego oraz pionowych sił tarcia cukru o powierzchnię czynną (membranę). Pomiaru dokonywano za pomocą elektrooporowych tensometrów naklejonych na jednym ze stalowych płaskowników oraz w dwóch miejscach na rurce stalowej.

Czujniki skalowano w specjalnie wykonanym urządzeniu, które umożliwiało obciążenie stalowej płytki czujnika obciążeniem o znanej wartości. Opis konstrukcji urządzenia i zasadę jego działania zamieszczono w pracy [63].

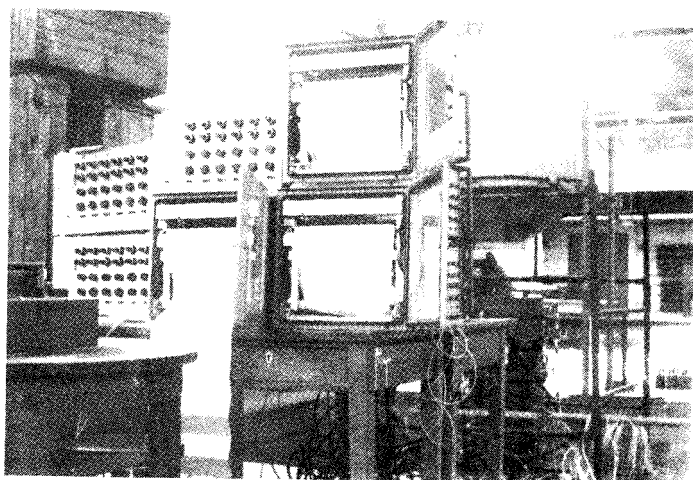


Rys.4.6. Przekrój pionowy badanego modelu silosu

Fig.4.6. Vertical section of the model of a silo studied



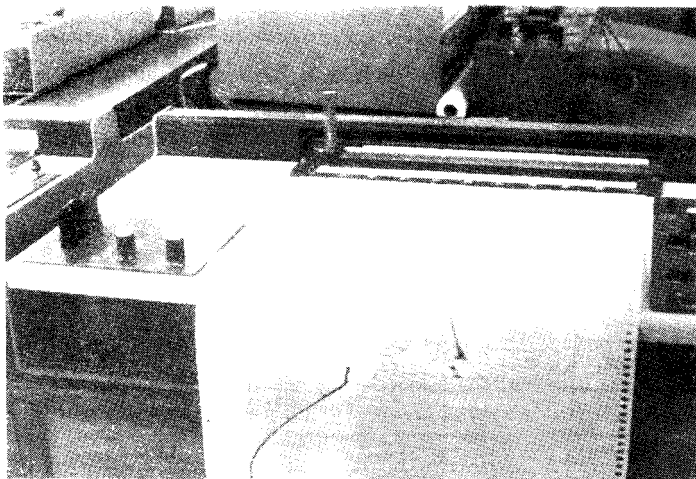
Rys.4.7. Widok czujnika zastosowanego do pomiaru naporu poziomego i siły tarcia materiału sypkiego o ścianę komory
 Fig.4.7. Strain gauge measuring horizontal pressure and friction force between the solid and the wall of a silo



Rys.4.8. Widok zestawu aparaturowego (po lewej stronie: mierniki TT-6c, po prawej: rejestratory punktowe KPSK-4, za rejestratorami: mierniki TDA-6)

Fig.4.8. Apparatus assembly (on the left: TT-6c strain gauges, on the right: KPSK-4 recorders, behind the recorders: TDA-6 meters)

Zakres skalowania czujników był różny, w zależności od potrzebnej czułości czujnika. Dla sił pionowych (stycznych do membrany) zakres wynosił od 0 do 15 N, dla sił poziomych zaś od 0 do 30 N.

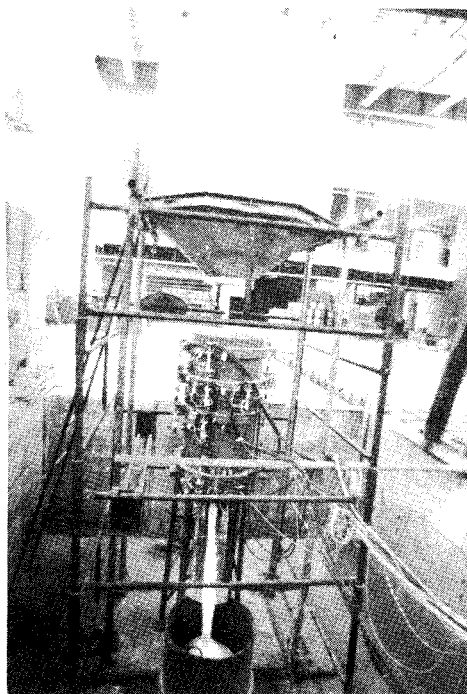


Rys.4.9. Widok rejestratora ciągłego zapisu Tz4100
Fig.4.9. Tz4100 recorder

Zestaw pomiarowy składał się z sześciu sześciokanałowych mierników elektrycznych typu TT-6c produkcji polskiej, z trzech mierników typu TDA-6 produkcji CSSR oraz 3 rejestratorów zapisu punktowego produkcji ZSRR i 5 rejestratorów zapisu ciągłego produkcji CSSR. Widoki fragmentów zestawu aparaturowego przedstawiono na rys.4.8 i 4.9.

Zastosowany zestaw aparaturowy umożliwiał jednoczesną rejestrację zmian oporności 54 par tensometrów elektrooporowych naklejonych na czujnikach naporu oraz na nogach płaszczu i dnie modelu silosu.

Na rysunku 4.10 przedstawiono stanowisko badawcze w trakcie pomiarów w modelu silosu o średnicy $D = 515$ mm. Zasyp materiału sypkiego odbywał się ze zbiornika o pojemności około $1,5 \text{ m}^3$, który umieszczono



Rys.4.10. Widok stanowiska badawczego w trakcie pomiarów
Fig.4.10. Test stand during measurements

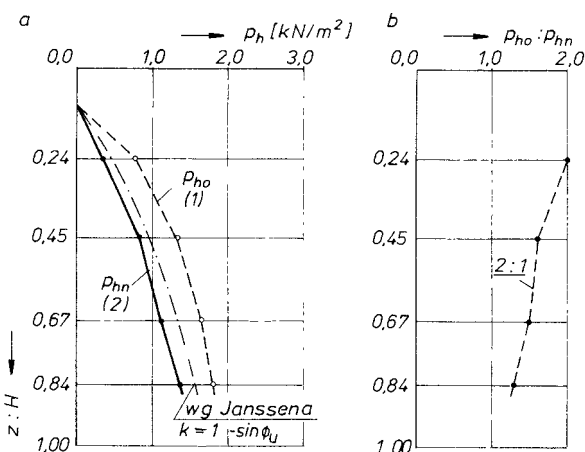
no bezpośrednio nad silosem przez oparcie go na rusztowaniu rurowym typu warszawskiego. Odbioru materiału sypkiego dokonywano do pojemników cylindrycznych umieszczonych obok badanego modelu. Pojemniki te podnoszone były za pomocą suwnicy ponad zbiornik zasypowy i następnie opróżniane. Zasypywanie komory silosu odbywało się ze zbiornika przez otwór $\varnothing 25$ usytuowany centralnie.

Jako materiał sypki wypełniający komory badanych modeli stosowano cukier lub pszenicę, których pomierzone wartości ciężaru objętościowego i kąta tarcia wewnętrznego zestawiono w tab.4.6.

T a b e l a 4.6

Właściwości fizyczne badanych materiałów sypkich

Rodzaj materiału	Ciężar objętościowy (KN/m ³)		Kąt tarcia wewnętrznego	Wilgotność (%)
	w stanie luźnym	w stanie zagęszczonym		
Cukier	8,18	9,22	31,8	0,10
Pszenica	8,18	9,13	29,8	11



Rys.4.11. Wykresy naporu poziomego pszenicy po napełnieniu oraz w trakcie symetrycznego opróżniania modelu silosu o średnicy 515 mm: 1 - napełnianie, 2 - opróżnianie, 3 - napór według Janssena

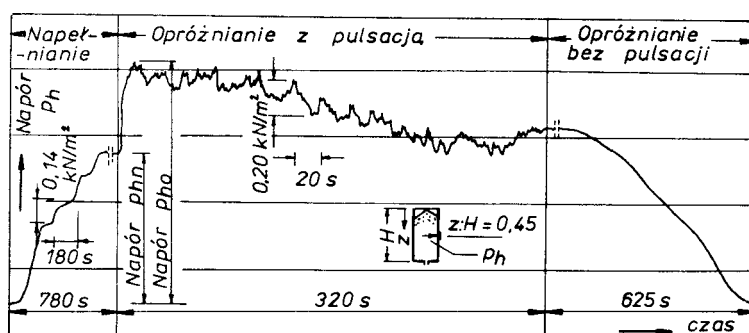
Fig.4.11. Wheat horizontal pressures after topping and during symmetric discharging of a 515 mm diameter model of a silo: 1 - filling, 2 - discharging, 3 - pressure (acc. to Janssen)

Wyniki pomiarów udowodniły, że smukłość komory silosu w sposób zasadniczy wpływa na wartość i rozkład naporu poziomego oraz globalnych obciążeń dna i ścian komory w trakcie opróżniania symetrycznego.

T a b e l a 4.7

Iloraz wartości naporu pszenicy pomierzonego w trakcie opróżniania i napełniania modelu silosu o średnicy 515 mm

Poziom $z : H$	Iloraz $p_{ho} : p_{hn}$	Średnia wartość (iloraz w przekroju pionowym)
0,25	2,04	1,61
0,45	1,56	
0,67	1,52	
0,84	1,33	



Rys.4.12. Przebieg dynamicznych zmian naporu poziomego pszenicy zarejestrowany w trakcie napełniania i opróżniania modelu silosu o średnicy 515 mm

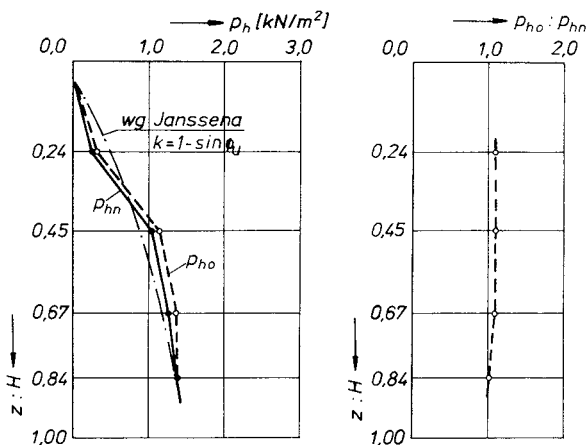
Fig.4.12. Dynamic changes in wheat horizontal pressure recorded during filling and emptying of a 515 mm diameter model of a silo

Na rysunku 4.11a pokazano przebieg naporu poziomego pszenicy po napełnieniu oraz w trakcie opróżniania komory modelu silosu o średnicy $D = 515$ mm. Na rysunku 4.11b natomiast przedstawiono wykresy ilorazów naporu w trakcie opróżniania i napełniania. Pomierzone wartości naporu poziomego po napełnieniu komory silosu są nieco mniejsze od wartości naporu wyznaczonych ze wzorów Janssena. W wyniku opróżniania modelu silosu wartości naporu wzrosły od 33 do 104%. Wartości ilorazów naporu obrazujące ten wzrost w trakcie opróżniania i napełniania zestawiono w tab. 4.7.

Dzięki zastosowaniu ciągłego zapisu zmian naporu stwierdzono, że w trakcie napełniania silosu wartości naporu poziomego zwiększają się skokowo. Można to wyjaśnić istnieniem cyklicznego spływu warstw pszenicy w kierunku ścian komory.

Początek opróżniania silosu charakteryzuje się nagłym wzrostem wartości naporu poziomego. Wiąże się to ze zmianą stanu naprężeń z czynnego

na bierny. Kontynuowanie procesu opróżniania wywołuje pulsację naporu o różnej amplitudzie i częstotliwości (makro- i mikropulsacja). Przykładowe zmiany naporu poziomego w trakcie napełniania i opróżniania modelu silosu o średnicy 515 mm przedstawiono na rys.4.12.



Rys.4.13. Wykresy naporu poziomego cukru po napełnieniu oraz w trakcie symetrycznego opróżniania modelu silosu o średnicy 515 mm

Fig.4.13. Sugar horizontal pressures after filling and during symmetric discharge of a 515 mm diameter model of a silo

Warto podkreślić, że pulsacja naporu poziomego występowała jedynie na wyższych poziomach komory ($z:H = 0,45$ i $z:H = 0,24$). W dolnej strefie silosu, oprócz nieznacznego wzrostu wartości naporu poziomego na początku opróżniania, nie zanotowano innych nagłych zmian naporu. Tłumaczyć to można istnieniem martwych stref materiału sypkiego, których zasięg w silosie z dnem płaskim zależy od średnicy komory i wielkości otworu wysypowego. Maksymalne wartości amplitudy zmian naporu wystąpiły na poziomie $z:H = 0,45$. Podczas makropulsacji różnica między minimalną a maksymalną wartością naporu poziomego sięgała do $0,20 \text{ kN/m}^2$. Częstotliwość makropulsacji wynosiła ok. $0,05 \text{ Hz}$. Podczas mikropulsacji zaś różnica wartości minimalnego i maksymalnego naporu poziomego wynosiła ok. $0,03 \text{ kN/m}^2$, zaś częstotliwość - ok. $0,3 \text{ Hz}$.

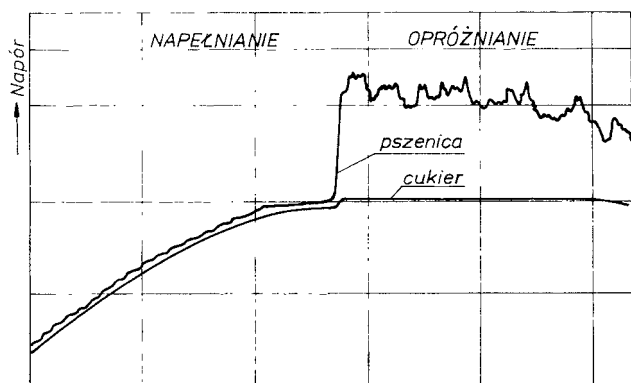
Wartości naporu cukru (rys.4.13), pomierzone po napełnieniu komory, równe są w przybliżeniu wartościom wyznaczonym teoretycznie metodą Janssena. W trakcie opróżniania modelu silosu wzrost naporu poziomego wynosił od 0 do 21% w zależności od poziomego usytuowania czujnika. Maksymalny wzrost wartości naporu cukru wystąpił na poziomie $z:H = 0,45$. Na poziomie $z:H = 0,84$ nie zanotowano żadnego wzrostu naporu. Na pod-

stawie analizy wyników pomiarów stwierdzono, że rozkład naporu cukru po obwodzie płaszcza komory ma charakter nierównomierny zarówno w trakcie napełniania, jak i opróżniania.

T a b e l a 4.8

Iloraz wartości naporu cukru pomierzonego w trakcie opróżniania i napełniania modelu silosu o średnicy 515 mm

Poziom $z : H$	Iloraz $p_{ho}:p_{hn}$	Średnia wartość ilorazu w przekroju pionowym
0,25	1,11	1,10
0,45	1,21	
0,67	1,09	
0,84	1,00	

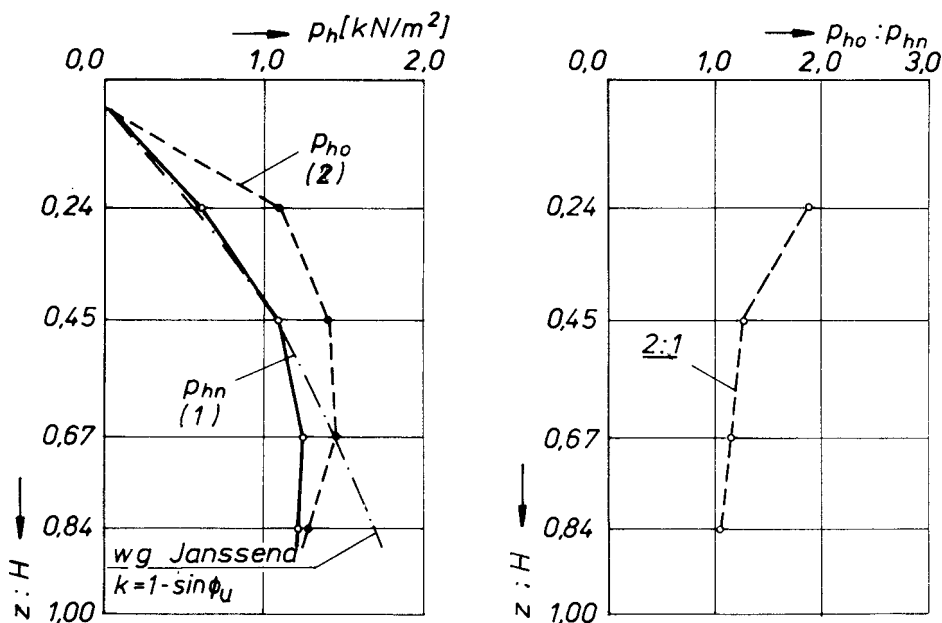


Rys.4.14. Fragmenty ciągłego zapisu zmian wartości naporu pszenicy i cukru w trakcie napełniania i opróżniania modelu silosu o średnicy 515 mm

Fig.4.14. Fragments of a continuous recording of wheat and sugar pressures during filling and discharging of a 515 mm diameter model of a silo

Wartości naporu poziomego w poszczególnych punktach na jednym poziomie nie różnią się między sobą więcej niż 10%. Wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego zestawiono w tab.4.8. W badaniach naporu cukru nie rejestrowano pulsacji naporu w trakcie opróżniania symetrycznego. Potwierdzają to fragmenty ciągłego zapisu zmian naporu przedstawione na rys.4.14.

Na rysunkach 4.15 i 4.16 przedstawiono wykresy naporu poziomego pszenicy w modelach silosów o średnicach 740 oraz 1040 mm. Wyniki badań tych modeli wykazały, że przebieg eksperymentalnej krzywej naporu pokrywa się z wykresem wyznaczonym na podstawie teorii Jenssena z wyjątkiem



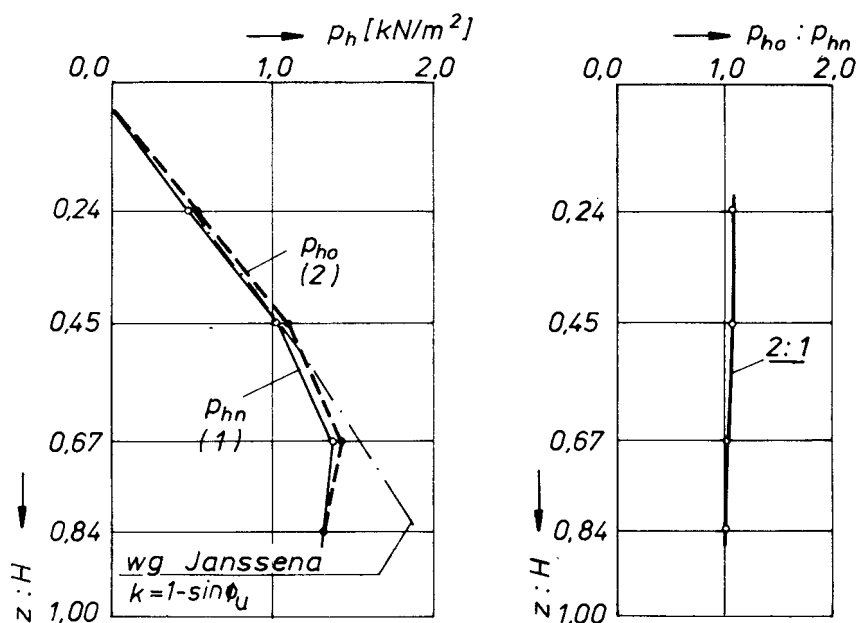
Rys.4.15. Wykresy naporu poziomego pszenicy po napełnieniu oraz w trakcie symetrycznego opróżniania modelu silosu o średnicy 740 mm: 1-napełnianie, 2-opróznicanie, 3 - napór według Janssena
Fig.4.15. Wheat horizontal pressures after filling and during symmetric discharge of a 740 mm diameter model of a silo: 1 - filling, 2 - discharge, 3 - pressure (acc. to Janssen)

dolnej strefy komory silosu, gdzie wyraźniej aniżeli w modelu $\varnothing 515$ mm zaznacza się odciążający wpływ dna.

W modelu $\varnothing 740$ mm, w trakcie jego opróżniania największy względny wzrost wartości naporu poziomego wystąpił na najwyższym poziomie ($z:H = 0,24$) i wynosił 85%. W pobliżu dna modelu wzrost wartości naporu pszenicy był nieznaczny (ok. 5%). W modelu silosu o średnicy 1040 mm wzrost naporu poziomego pszenicy w trakcie opróżniania był mały na wszystkich badanych poziomach i nie przekraczał 10% wartości naporu pomierzonego po napełnieniu komory silosu. Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania, obliczonych dla obydwu modeli, zamieszczono w tab.4.9 i 4.10.

Na rysunku 4.17 przedstawiono wykresy naporu cukru oraz współczynników zmiany naporu w trakcie napełniania i symetrycznego opróżniania modelu silosu $\varnothing 740$ mm.

Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, że wartości naporu poziomego pomierzone po napełnieniu komory odpowiadają w przybliżeniu w górnej strefie silosu wartościom wyznaczonym według teorii Janssena. W dolnej strefie komory modelu wartości naporu są znacznie mniejsze niż wartości teoretyczne.



Rys.4.16. Wykresy naporu poziomego pszenicy po napełnieniu oraz w trakcie symetrycznego opróżniania modelu silosu o średnicy 1040 mm

Fig.4.16. Wheat horizontal pressures after filling and during symmetric discharge of a 1040 mm diameter model of a silo

T a b e l a 4.9

Iloraz wartości naporu pszenicy w trakcie opróżniania i napełniania modelu silosu o średnicy 740 mm

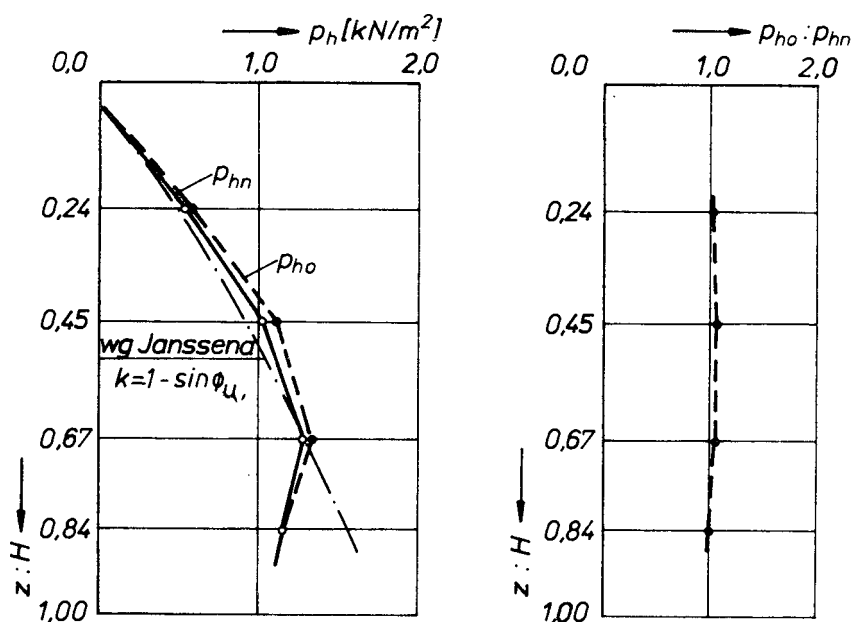
Poziom z : H	Iloraz $p_{ho} : p_{hn}$	Średnica wartości ilorazu $p_{ho} : p_{hn}$ w przekroju pionowym
0,24	1,85	1,34
0,45	1,27	
0,67	1,17	
0,84	1,05	

W trakcie opróżniania występuje wzrost wartości naporu poziomego w granicach od 2 do 7%. Wartości ilorazów naporu opróżniania i napełniania zestawiono w tab.4.11.

W trakcie opróżniania modelu $\varnothing$ 1044 mm przez otwór wysypowy usytuowany w osi komory nie stwierdzono prawie żadnego wzrostu wartości naporu poziomego cukru. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.4.18 oraz w tab. 4.12.

Wartości ilorazu naporu pszenicy w trakcie opróżniania
i napełniania modelu silosu o średnicy 1040 mm

Poziom z : H	Iloraz $p_{ho}:p_{hn}$	Średnia wartość ilorazu $p_{ho}:p_{hn}$ w przekroju pionowym
0,24	1,07	1,05
0,45	1,08	
0,67	1,03	
0,84	1,00	



Rys.4.17. Wykresy naporu poziomego cukru po napełnieniu oraz w trakcie symetrycznego opróżniania modelu silosu o średnicy 740 mm

Fig.4.17. Sugar horizontal pressures after filling and during a symmetric discharge of a 740 mm diameter model of a silo

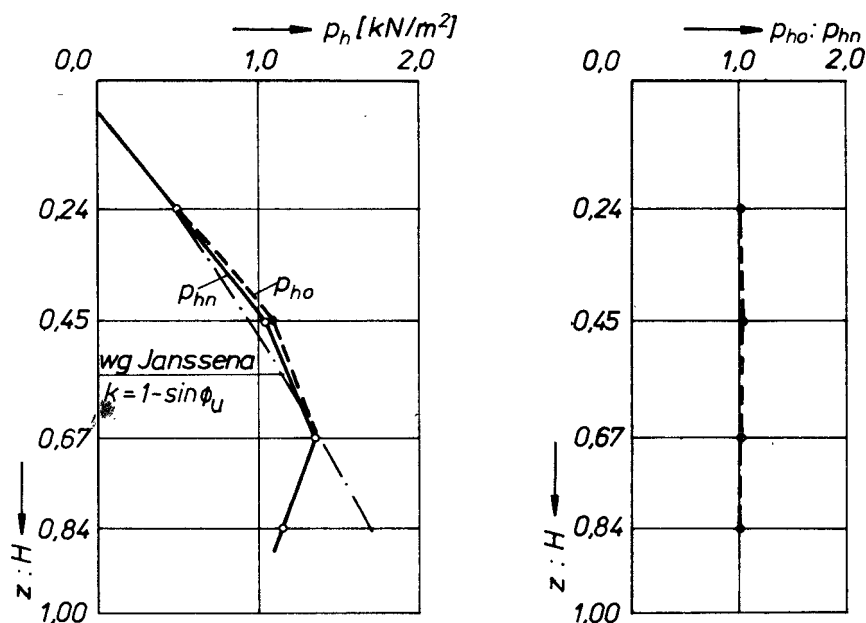
Przedstawione wyniki pomiarów naporu poziomego pszenicy i cukru pozwalają na określenie granicznej smukłości silosu, poniżej której można nie uwzględniać wzrostu naporu poziomego pszenicy i cukru w trakcie opróżniania komory. Wraz ze wzrostem smukłości komory powiększa się wzrost wartości naporu opróżniania. Wzrost wartości naporu poziomego cukru podczas opróżniania silosu jest mniejszy aniżeli w silosie obciążonym psze-

T a b e l a 4.11

Wartości ilorazu naporu cukru w trakcie opróżniania
i napełniania modelu silosu o średnicy 740 mm

Poziom $z : H$	Iloraz $p_{ho}:p_{hn}$	Średnia wartość ilorazu $p_{ho}:p_{hn}$ w przekroju pionowym
0,24	1,02	1,04
0,45	1,07	
0,67	1,05	
0,84	1,00	

nicą. Porównanie ilorazów wartości naporów pomierzonych w trakcie opróżniania i napełniania badanych silosów przedstawiono na rys.4.19. Na rysunku 4.20 zaś zamieszczono wykresy zmiany średnich wartości tych ilorazów w zależności od smukłości komór silosów.



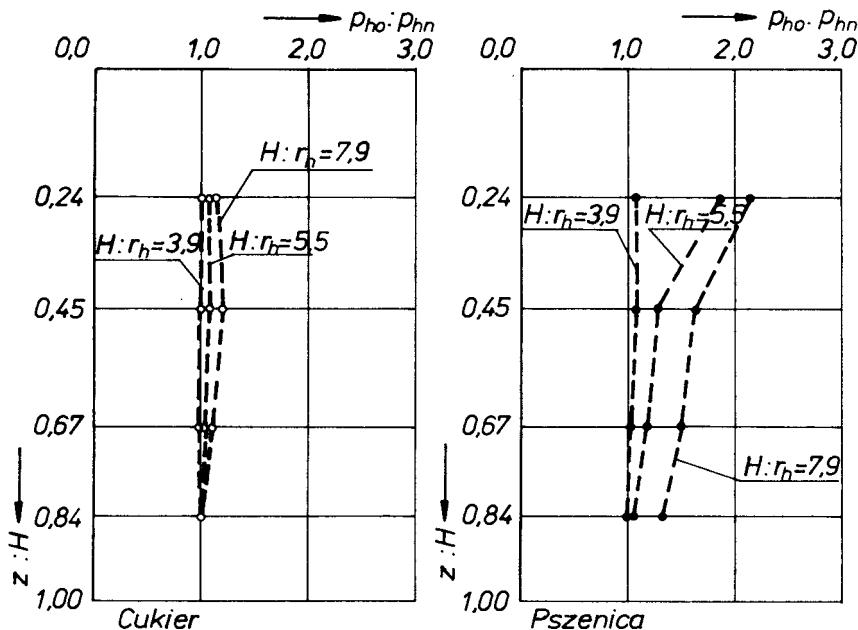
Rys.4.18. Wykresy naporu poziomego cukru po napełnieniu oraz w trakcie symetrycznego opróżniania modelu silosu o średnicy 1040 mm

Fig.4.18. Sugar horizontal pressures after filling and during a symmetric discharge of a 1040 mm diameter model of a silo

Różnice w wartościach wzrostu naporu poziomego, powstające w wyniku opróżniania komór wypełnionych różnym materiałem sypkim, można wyzłu-

Wartości ilorazu naporu cukru w trakcie opróżniania
i napełniania modelu silosu o średnicy 1040 mm

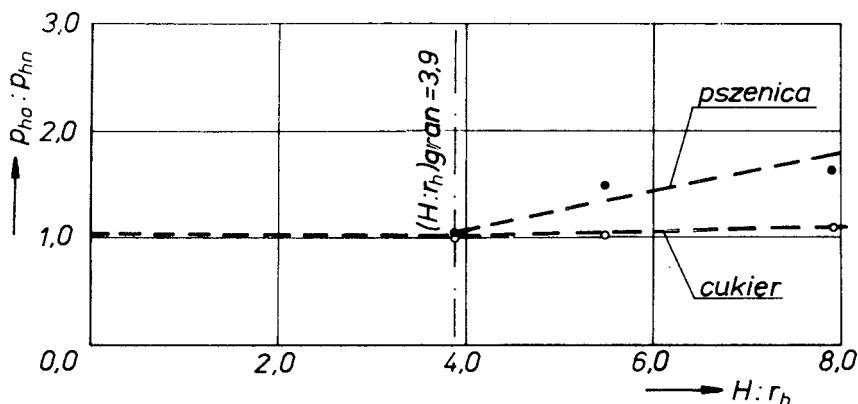
Poziom $z : H$	Iloraz $p_{ho} : p_{hn}$	Średnia wartość ilorazu $p_{ho} : p_{hn}$ w przekroju pionowym
0,24	1,00	1,00
0,45	1,01	
0,67	1,00	
0,84	1,00	



Rys.4.19. Porównanie wykresów ilorazów naporów pomierzonych podczas opróżniania i napełniania badanych modeli
($H : r_h$ - smukłość komór)

Fig.4.19. Comparison of the ratios of discharge-to-filling pressures of the models studied ($H : r_h$ - chamber slenderness ratios)

maczyć odmiennym rodzajem przepływu cukru i pszenicy. Przeprowadzone przez autora obserwacje ruchu powierzchniowych warstw materiału sypkiego pozwalają na stwierdzenie, że w trakcie opróżniania silosu przepływ cukru przybiera od samego początku formę przepływu rdzeniowego, pszenica zaś szczególnie w górnej strefie przepływa prawie całym przekrojem komory.



Rys.4.20. Wykres wpływu smukłości komory silosu na wartość wzrostu naporu poziomego cukru i pszenicy w trakcie opróżniania: ($H:r_h$), gran. - graniczna wartość smukłości komory, poniżej której można pominąć wzrost naporu poziomego

Fig.4.20. The effect of the chamber slenderness ratio on the increase of sugar and wheat horizontal pressures during discharge, ($H:r_h$), gran. - limiting value of the chamber slenderness ratio below which the increase in the horizontal pressure can be neglected

T a b e l a 4.13

Pionowe obciążenia ścian i den badanych modeli silosów
(materiał sypki - pszenica)

Element konstrukcji silosu	Obciążenie elementu konstrukcji silosu o średnicy D					
	Napełnianie Q_n (N)			Opróżnianie Q_o (N)		
	D=0,515m	D=0,74m	D=1,04m	D=0,515m	D=0,74m	D=1,04m
ściana	592	1361	2359	733	1515	2453
dno	1134	2046	4400	1011	1960	4409

T a b e l a 4.14

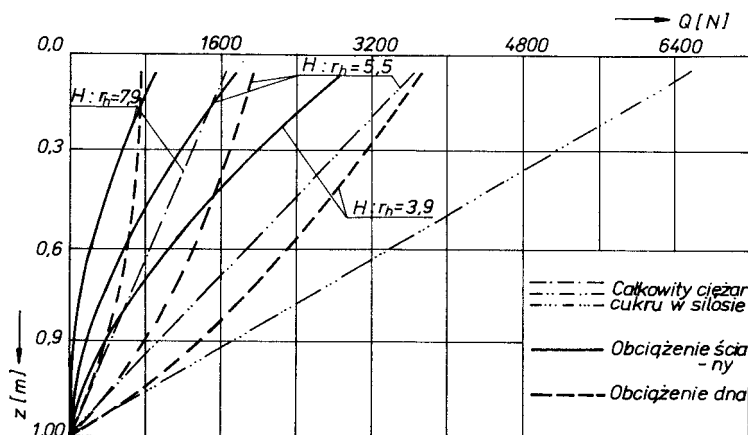
Pionowe obciążenia ścian i dna badanych modeli silosów
(materiał sypki - cukier)

Element konstrukcji silosu	Obciążenie elementu konstrukcji silosu o średnicy D					
	Napełnianie Q_n (N)			Opróżnianie Q_o (N)		
	D=0,515 m	D=0,74 m	D=1,04 m	D=0,515 m	D=0,74 m	D=1,04 m
ściana	890	1744	2876	943	1787	2888
dno	766	1921	3707	689	1881	3617

Badania pionowych obciążeń dna i ścian modeli silosów wykazały, że rozdział ciężaru materiału sypkiego jest ściśle związany ze smukłością komory. Wyniki pomiarów zestawiono w tab.4.13 i 4.14. Przez siły tarcia przekazywała się na ściany modeli następująca część materiału sypkiego:

- w modelu $\varnothing$ 515 mm - pszenica: 42%, cukier: 54%
- w modelu $\varnothing$ 740 mm - pszenica: 39,9%, cukier 48%
- w modelu $\varnothing$ 1040 mm - pszenica: 34,9%, cukier 44%.

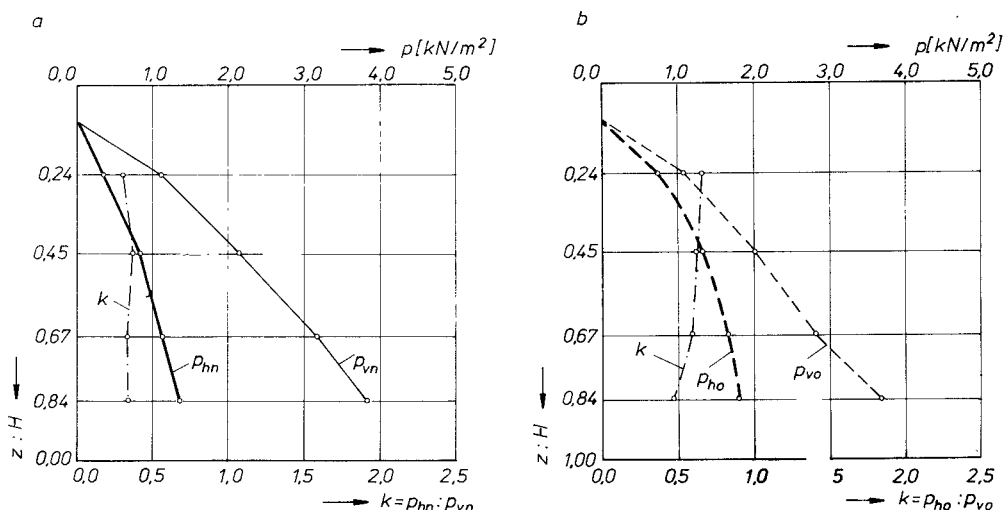
Pozostała część materiału sypkiego wypełniającego komorę silosu była przekazywana na jego dno. Na rysunku 4.21 przedstawiono wykresy zmian obciążeń pionowych ścian i den badanych modeli silosów zarejestrowane podczas napełniania. Na podstawie tych wykresów i podanych liczb procentowego obciążenia ścian można stwierdzić, że wraz ze zmianą smukłości komory silosu następuje przegrupowanie wartości obciążeń pionowych ścian i dna. Wraz ze wzrostem smukłości komory wartość względnego obciążenia ściany zwiększa się, zaś dna maleje. Wartości rozdziału tych obciążeń zależą również od rodzaju materiału sypkiego.



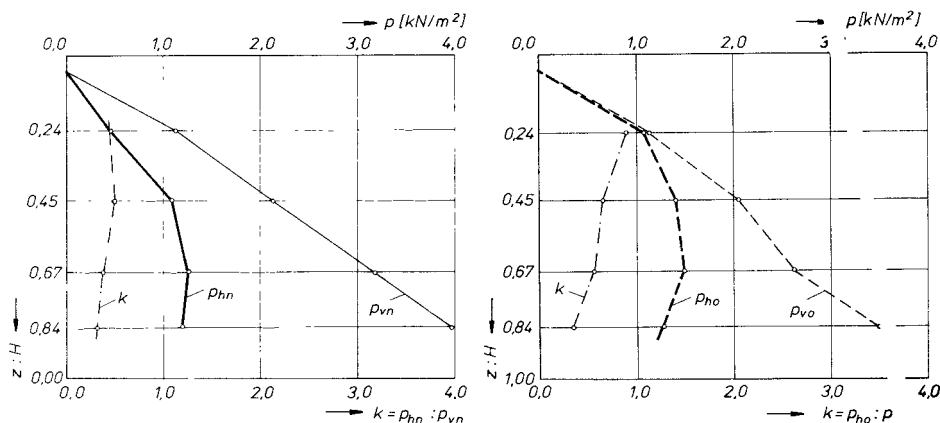
Rys.4.21. Wykresy obciążeń ścian i den modeli silosów w trakcie napełniania komory cukrem
Fig.4.21. Loads acting on the walls and the floor of the models of a silo during filling with sugar

Na przykładzie pomiarów naporu pszenicy wykazano również zależność wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego od smukłości komory silosu podczas jego opróżniania.

Wartości naporu pionowego pszenicy wyznaczono z warunków równowagi sił, przyjąwszy z pomiarów ciężar pszenicy wypełniającej model silosu oraz wartości sił tarcia pszenicy o ścianę komory. Wykresy naporu poziomego i pionowego oraz wartości ich ilorazów przedstawiono na rys. 4.22-4.24.

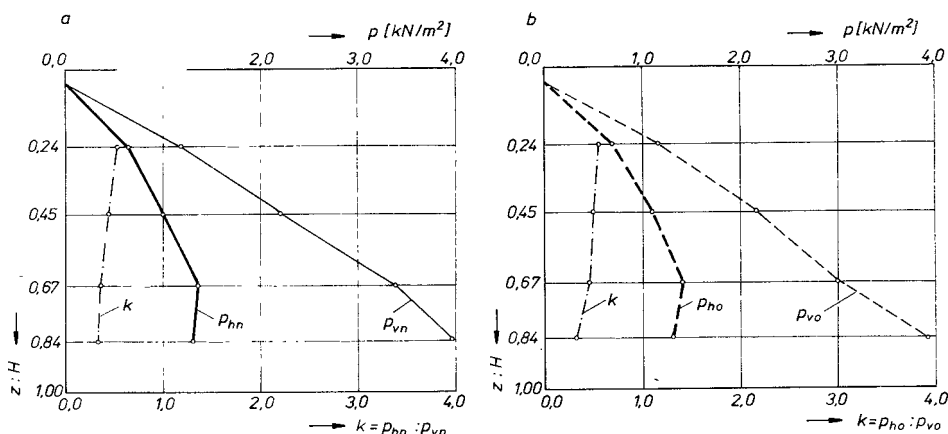


Rys.4.22. Wykres naporu poziomego i pionowego oraz ich ilorazu w modelu silosu o średnicy 515 mm: a - napeinianie, b - opróżnianie.
Fig.4.22. Horizontal and vertical pressures and their ratio in the model of a 515 mm diameter silo (1-filling, 2-discharging).



Rys.4.23. Wykres naporu poziomego i pionowego oraz ich ilorazu w modelu silosu o średnicy 740 mm: a - napeinianie, b - opróżnianie.
Fig.4.23. Horizontal and vertical pressures and their ratio in the model of a 740 mm diameter silo (1 - filling, 2 - discharging).

Przedstawione na tych rysunkach wyniki obliczeń dowodzą, że wartości naporu pionowego pszenicy zmniejszają się z chwilą rozpoczęcia opróżniania silosu.



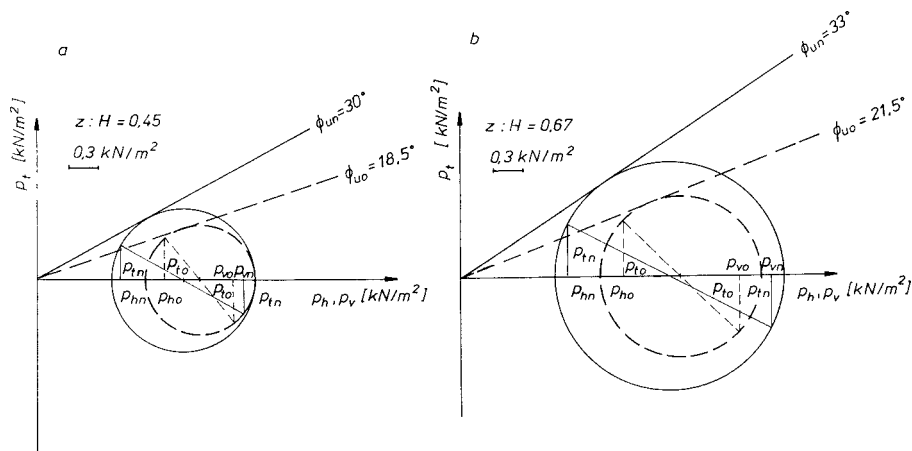
Rys.4.24. Wykres naporu poziomego i pionowego oraz ich ilorazu w modelu silosu o średnicy 1040 mm: a - napełnianie, b - opróżnianie
Fig.4.24. Horizontal and vertical pressures and their ratio in the model of a 1040 mm diameter silo (1 - filling, 2 - discharging)

Największy spadek wartości naporu pionowego wystąpił w modelu o największej smukłości (ϕ 515 mm), najmniejszy zaś w modelu o największej średnicy (ϕ 1040 mm). Wiąże się to bezpośrednio z wielkością zmian sił tarcia pszenicy o ścianę modelu. W modelu o średnicy 515 mm wzrost sił tarcia w trakcie opróżniania komory był największy i wynosił ok. 24%. W modelu o średnicy 1040 mm wzrost sił tarcia nie przekraczał 4%.

Wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego po napełnieniu silosu były prawie jednakowe na odpowiadających sobie poziomach we wszystkich silosach i wynosiły od 0,3 do 0,5. Charakterystyczny jest rozkład wartości tego ilorazu wzdłuż wysokości komór. W dolnej części silosu notuje się mniejsze wartości odpowiadające $k = \tan^2(45 - 0,5 \phi_u)$, w górnej strefie zaś wartości ilorazu są większe i zbliżają się do wartości $k = (1 - \sin \phi_u)$. Szczególnie wyraźnie widoczne jest to w modelach o większej średnicy.

W trakcie opróżniania modeli silosów wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego zwiększyły się, wykazując ścisłą zależność od smukłości komory.

Na rysunku 4.25 za pomocą koła Mohra przedstawiono stan naprężeń w pszenicy bezpośrednio przy ścianie modelu silosu o średnicy 515 mm. Przedstawione na tych rysunkach wykresy udowadniają, że kąt tarcia wewnętrznego nie jest wartością stałą. Po napełnieniu silosu wartości kąta tarcia wewnętrznego są większe w wyższych strefach komory. W przedstawionym przykładzie na rys. 4.20 na poziomie $z : H = 0,45$ wartość kąta



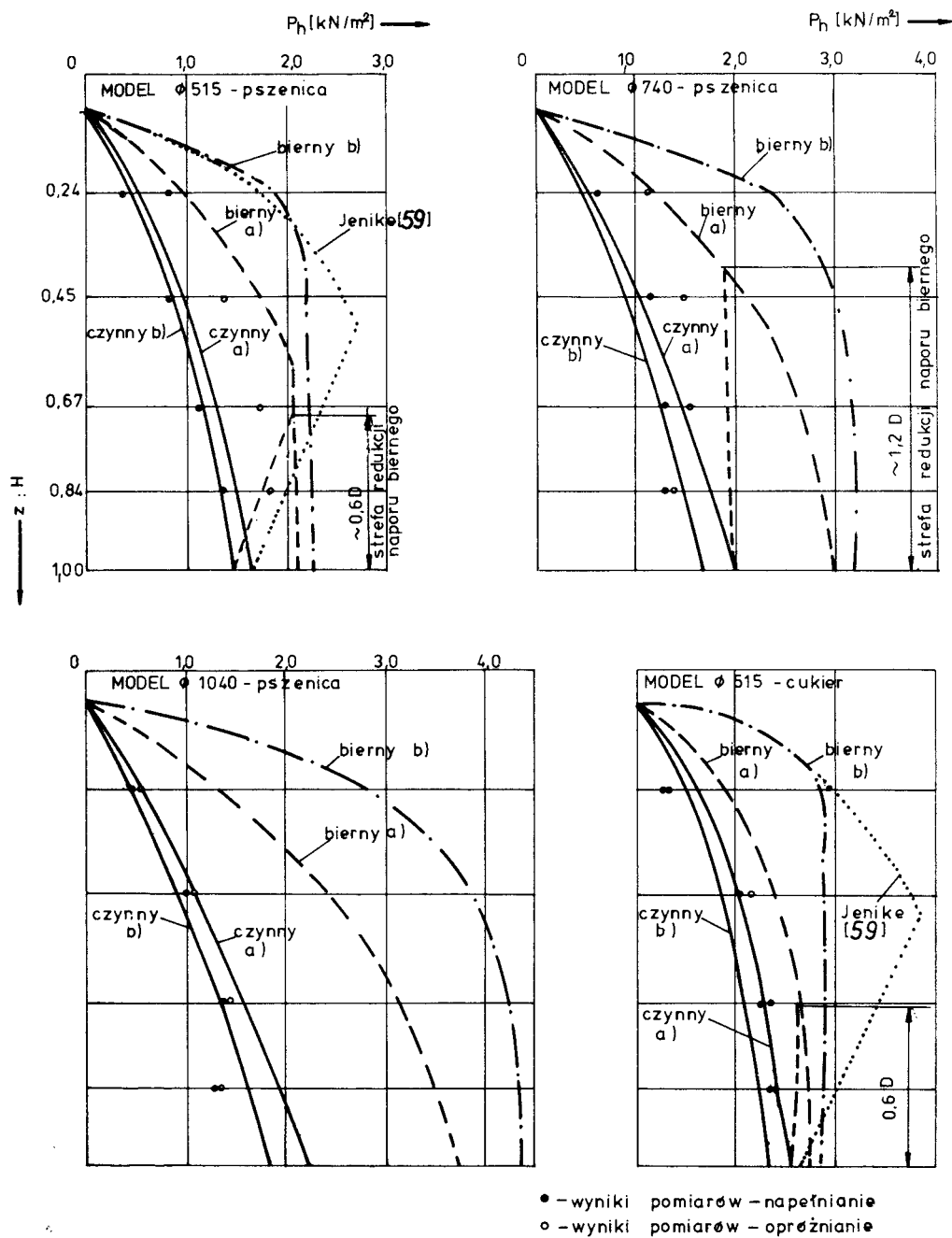
Rys.4.25. Stan naprężeń przy ścianie modelu silosu o średnicy 515 mm przedstawiony za pomocą koła Mohra (linie ciągłe - napełnianie, linie przerywane - opróżnianie)

Fig.4.25. Mohr stress circle for the state of stress close to the wall of a 515 mm diameter model of a silo (solid lines - filling, broken lines - discharging)

tarcia wewnętrznego jest większe aniżeli na poziomie $z : H = 0,67$. W trakcie opróżniania modeli silosów wartość kąta tarcia wewnętrznego zmniejsza się $\phi_{uo} < \phi_{un}$.

W przepisach norm [1,21,149,156] występują istotne różnice w ilościowym przyjęciu wielkości naporu poziomego materiału sypkiego w silosach o małej smukłości. Opisane badania trzech modeli silosów wykazały, że smukłość komory ma określony wpływ na wartości naporu materiału sypkiego. Wyniki tych badań potwierdzają możliwość redukcji wartości naporu poziomego opróżniania w silosach o małej smukłości komór. Nie można jednak całkowicie wykluczyć, jak to zaproponowano w projekcie normy DIN 1055, wzrostu wartości naporu poziomego w silosach o smukłościach $H : D = 1,0$. Badania modelu silosu o smukłości $H : D = 0,97$ ($D = 1040$ mm) wykazały, że w takich silosach należy się liczyć ze wzrostem naporu sięgającym 8% naporu napełniania. Uwzględniając dodatkowo nierównomierność rozkładu naporu poziomego należałoby podczas wyznaczania naporu opróżniania w silosach $H : D = 1,0$ zastosować współczynnik zmiany naporu wyznaczony w pomiarach, zwiększony o około 10-15%. Również na podstawie wyników powyższych badań można by zaproponować wartość tego współczynnika 1,25.

W silosach bardziej smukłych (w badaniach $H : D = 1,97$) stwierdzono występowanie pulsacji naporu, której częstotliwość wynosiła od 0,03



Rys.4.26. Porównanie wyników badań z rozwiązaniami teoretycznymi Dreschera i Jenikego (a i b - przypadki uplastycznienia wg Dreschera)
Fig.4.26. Comparison of the obtained results with theoretical studies by Drescher and Jenike (a and b - plastic cases by Drescher)

do 0,5 Hz. Występowanie pulsacji naporu kwalifikuje napór poziomy materiału sypkiego w silosach do obciążeń wielokrotnie zmiennych, które wywołują w materiałach konstrukcyjnych zjawisko ich zmęczenia, a także mogą się stać przyczyną znacznego zwiększenia się szerokości rys w żelbetowych ścianach komór.

Wpływ smukłości komory w silosach opróżnianych niesymetrycznie omówiono szerzej w rozdz. 5.

Na rysunku 4.26 dokonano porównania wyników badań własnych z teoretycznymi rozwiązaniami Dreschera [24] i Jenikego [59]. Wykresy naporu według Dreschera sporządzono dla dwóch przypadków uplastycznienia materiału sypkiego:

- przypadek a - uplastycznienia przy ścianie silosu
- przypadek b - uplastycznienie w środku komory.

Przypadek c, obejmujący uplastycznienie materiału sypkiego zarówno w środku, jak i przy ścianie silosu pominięto, gdyż obliczone wartości naporu zawierają się między wykresami wyznaczonymi dla przypadków a i b.

Do obliczeń porównawczych przyjęto następujące wartości fizycznych cech materiału sypkiego:

- dla pszenicy: $\gamma = 8,0 \text{ kN/m}^3$, $\phi_u = 30^\circ$, $\phi_s = 25^\circ$
- dla cukru: $\gamma = 8,2 \text{ kN/m}^3$, $\phi_u = 32^\circ$, $\phi_s = 29^\circ$.

Ze wzoru Dreschera określającego napór pionowy materiału sypkiego w przepływie quasi - statycznym

$$p_v = \frac{\gamma R}{mM} \left(1 - e^{-\frac{mM}{R} z} \right)$$

otrzymano różne wyrażenia dla dwóch przypadków uplastycznienia w stanie czynnym i biernym:

1. Model ϕ 515 mm, materiał sypki - pszenica

a) uplastycznienie przy ścianie:

stan czynny $p_v = 5,42 (1 - e^{-1,476z})$,

stan bierny $p_v = 1,95 (1 - e^{-4,109z})$,

b) uplastycznienie w środku:

stan czynny $p_v = 6,64 (1 - e^{-1,204z})$,

stan bierny $p_v = 0,74 (1 - e^{-10,860z})$.

2. Model ϕ 740 mm, materiał sypki - pszenica

a) uplastycznienie przy ścianie:

stan czynny $p_v = 7,79 (1 - e^{-1,026z})$,

stan bierny $p_v = 2,79 (1 - e^{-2,857z})$,

b) uplastycznienie w środku:

stan czynny $p_v = 9,55 (1 - e^{-0,837z})$,

stan bierny $p_v = 1,06 (1 - e^{-7,555z})$.

3. Model ϕ 1040 mm, materiał sypki - pszenica

a) uplastycznienie przy ścianie:

stan czynny $p_v = 10,95 (1 - e^{-0,731z})$,

stan bierny $p_v = 3,93 (1 - e^{-2,035z})$,

b) uplastycznienie w środku:

stan czynny $p_v = 13,41 (1 - e^{-0,596z})$,

stan bierny $p_v = 1,49 (1 - e^{-5,380z})$.

4. Model ϕ 515 mm, materiał sypki - cukier

a) uplastycznienie przy ścianie:

stan czynny $p_v = 3,92 (1 - e^{-2,043z})$,

stan bierny $p_v = 2,23 (1 - e^{-3,604z})$,

b) uplastycznienie w środku:

stan czynny $p_v = 5,51 (1 - e^{-1,452z})$,

stan bierny $p_v = 0,57 (1 - e^{-14,120z})$.

Napór poziomy p_h obliczono ze związku:

$$p_h = k p_v,$$

gdzie

$$k = \frac{M}{\operatorname{tg} \phi_s}.$$

Wartość parametru płynięcia M wyznaczono z tablic zamieszczonych w pracy Dreschera.

Obliczenia naporu poziomego metodą Jenikego oparto na jego praktycznych wskazówkach zawartych w pracy [59] cz.4. Ponieważ autor ten podał rozwiązania obejmujące wyznaczanie naporu w silosach z przepływem rdzeniowym o smukłości komory $H : D$ od 2 do 5, przeto porównanie z wynikami badań własnych jest możliwe jedynie dla modelu o średnicy 515 mm.

Maksymalna wartość naporu poziomego na wysokości równej średnicy komory wynosi:

- dla pszenicy

$$\left(\frac{p_h}{D} \right)_{\max} = 0,65,$$

stąd

$$p_h = 0,65 \times 8,0 \times 0,515 = 2,68 \text{ kN/m}^2$$

- dla cukru

$$\left(\frac{p_h}{D}\right)_{\max} = 0,60,$$

stąd

$$p_h = 0,60 \times 8,0 \times 0,515 = 2,47 \text{ kN/m}^2.$$

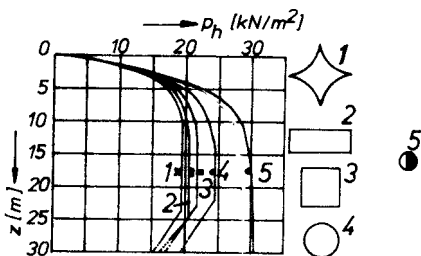
Z przedstawionego na rys.4.26 porównania wyników pomiarów z rozwiązaniami teoretycznymi można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Teoretyczne wartości naporu poziomego wyznaczone metodą Dreschera dla czynnego stanu naprężeń wykazują bardzo dobrą zgodność z eksperymentalnymi wynikami badań wykonanych dla fazy napełniania silosu.
2. W silosach krępych (model ϕ 1040 mm), charakteryzujących się smukłością komory $H : r_h \leq 3,9$, wartości naporu poziomego w fazie napełniania i opróżniania są praktycznie jednakowe i mogą być wyznaczane metodą Dreschera dla czynnego stanu naprężeń po przyjęciu hipotezy uplastycznienia materiału sypkiego przy ścianach zbiornika.
3. W silosach o smukłości $3,9 < H : r_h \leq 7,9$ (modele ϕ 515 mm i ϕ 740 mm) pomierzone wartości naporu poziomego w fazie opróżniania silosu wykazują najlepszą zgodność z wynikami obliczeń teoretycznych metodą Dreschera dla biernego stanu naprężeń po przyjęciu hipotezy uplastycznienia a. W dolnej strefie komory należałoby dokonać redukcji naporu teoretycznego zgodnie z rys. 4.26.
4. Teoretyczne wartości, które proponuje Jenike, znacznie przewyższają pomierzone wartości naporu poziomego.

4.3. Kształt komór

4.3.1. Kształt przekroju poziomego komór

Wpływ kształtu przekroju poziomego komory po jej napełnieniu ujęty jest we wzorach Janssena przez uwzględnienie wartości promienia hydraulicznego. Rozpatrując komory silosu o identycznej powierzchni przekroju poziomego, lecz różniące się kształtem (np. koło, kwadrat, prostokąt, gwiazdka itp.) otrzymamy wartości promienia hydraulicznego różniące się między sobą nie więcej aniżeli 20%. W tym samym stosunku będą się różniły wartości naporu poziomego materiału sypkiego obliczonego dla tych komór. Zagadnieniem tym zajmował się Pieper [120,123]. W ślad za jego pracą [120] na rys. 4.27 przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń naporu poziomego pszenicy działającego po napełnieniu komór o identycznej



Rys.4.27. Porównanie wartości naporu poziomego obliczonego w komorach silosów o identycznej powierzchni przekroju poziomego, lecz różnym kształcie [120]

Fig.4.27. Comparison of the horizontal pressure measured in the silos of identical areas but different shapes of transverse sections

powierzchni przekroju poziomego, lecz różnym kształcie. Z przedstawionych na tym rysunku wykresów wynika, że duży wpływ na wartości naporu poziomego ma długość obwodu poziomego przekroju komory. Im większa jest długość tego obwodu, tym mniejsze są wartości naporu poziomego.

Od kształtu poziomego przekroju komory zależęć będzie również rozkład naporu poziomego materiału sypkiego wzdłuż obwodu tego przekroju. Na rysunku 4.28 przedstawiono schematy rozkładów naporu poziomego materiału syp-

kiego, wynikające z badań różnych autorów. Janssen [56] dla kołowego przekroju komory przyjął równomierny rozkład naporu poziomego. W komorze kwadratowej otrzymał Janssen rozkład naporu w funkcji kosinusowej.

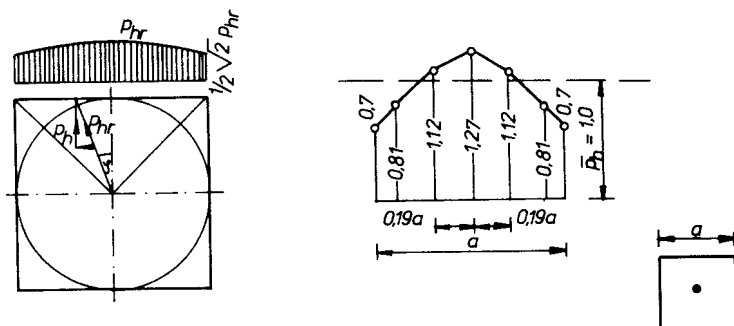
Pleissner [134] prowadził badania rozkładu naporu poziomego w prostokątnych komorach silosów w skali naturalnej. Wymiary wynosiły: 1,60 x 1,60 m ($H = 18,0$ m), 1,50 x 1,50 m ($H = 18,0$ m), 2,51 x 2,90 m ($H = 9,0$ m) oraz 2,80 x 3,15 m ($H = 17,24$ m). Jako materiał obciążający stosował Pleissner pszenicę, żyto, rzepak lub nasiona lnu. Wyniki pomiarów potwierdziły w sensie jakościowym rozkład naporu przedstawiony przez Janssena. Większa była jednak w badaniach Pleissnera nierównomierność rozkładu naporu poziomego. Różnice wartości naporu pomierzonego w narożach komór i w środku rozpiętości ściany sięgały ok. 50% (rys.4.28).

Wagner [160] badał rozkład naporu poziomego piasku i pszenicy w dwóch modelach komór silosów o przekroju kwadratowym i w kształcie gwiazdki. Zewnętrzne wymiary obydwu komór były równe i wynosiły: przekrój - 70 x 70 cm, wysokość - 6,00 m. Wyniki pomiarów potwierdziły również występowanie charakterystycznej nierównomierności rozkładu naporu poziomego w przekrojach komór o innym kształcie aniżeli kołowy (rys.4.28).

W pomiarach Wagnera zaskakujący jest różny rozkład naporu poziomego pszenicy i piasku występujący w kwadratowej komorze. Różnice te podkreślają potrzebę przywiązywania większej wagi w obliczaniu naporu do wartości cech fizycznych materiału sypkiego. Wskazuje to również, że nie można uogólniać na wszystkie materiały sypkie badań prowadzonych tylko na jednym materiale. Badania Wagnera wykazały także, że w komorze gwiazdkowej wystąpiła większa nierównomierność rozkładu naporu poziomego aniżeli w komorze kwadratowej.

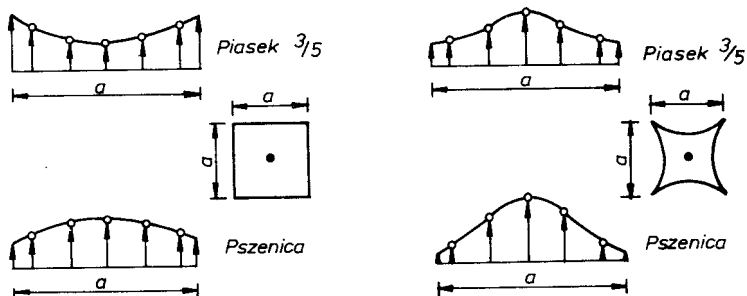
JANSSEN [56]

PLEISSNER [134]



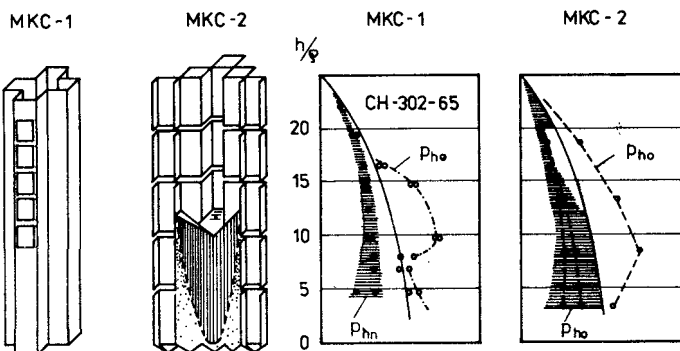
WAGNER [160]

WAGNER [160]



Rys.4.28. Schematy rozkładu naporu poziomego wzdłuż obwodu komór o różnych kształtach

Fig.4.28. The distribution of a horizontal pressure along the circumference of chambers of different shapes



Rys.4.29. Wyniki badań naporu pszenicy w modelach silosów w kształcie krzyża [49], a - model z blachy stalowej, b - model ze szkła organicznego

Fig.4.29. Results for wheat pressure in the models of silos of a cross-like shape; [49], a - model made of steel sheet, b - model made of organic glass

Pomiary wartości naporu pszenicy w komorze silosu w kształcie krzyża zostały wykonane przez Horośego i in. [49]. Badania te przeprowadzono na dwóch modelach silosów wykonanych ze stalowej blachy oraz ze szkła organicznego. Pierwszy stalowy model miał wymiary w rzucie 5 x 12 x 12 cm i wysokość równą 120 cm. Do pomiarów zastosowano czujniki o wymiarach 12 x 12 cm wmontowane w jedną z czołowych ścian komory (rys.4.29a). Drugi model miał wymiary w przekroju poziomym 5 x 20 x 20 cm i wysokość 200 cm. Wartości naporu poziomego w tym modelu określono pośrednio przez tensometryczny pomiar odkształceń ścian komory.

Badania pierwszego modelu wykazały, że wartości naporu poziomego po napełnieniu komory w kształcie krzyża są prawie 25% mniejsze od wartości teoretycznych obliczonych ze wzorów Janssena. W celu porównania wyników z badaniami komór o innych kształtach wykonano dodatkowe pomiary w modelu silosu z komorą kwadratową. Pomierzone wartości naporu w tej komorze były tylko 5-7% mniejsze od wartości teoretycznych.

Wyniki badań uzyskane w drugim modelu pozwoliły na określenie rozkładu naporu poziomego pszenicy na dwóch ścianach krzyżowego przekroju komory (na ścianie czołowej i bocznej). Po napełnieniu komory wartości naporu poziomego pomierzone na ścianie czołowej były wyższe od wartości naporu na ścianie bocznej prawie 30%. Podczas opróżniania zaobserwowana została zmiana rozkładu naporu poziomego. Na ścianach bocznych wartości naporu były 38% większe od naporu działającego na ścianach czołowych. Wzrost wartości naporu poziomego podczas opróżniania był niższy w drugim modelu i wynosił około 25%. Przyczyną tego mogła być mniejsza w tym modelu sztywność ścian komory.

Badania komór silosów typu koncentrycznego, wykonane m.in. przez autora, przedstawiono w rozdz. 6.

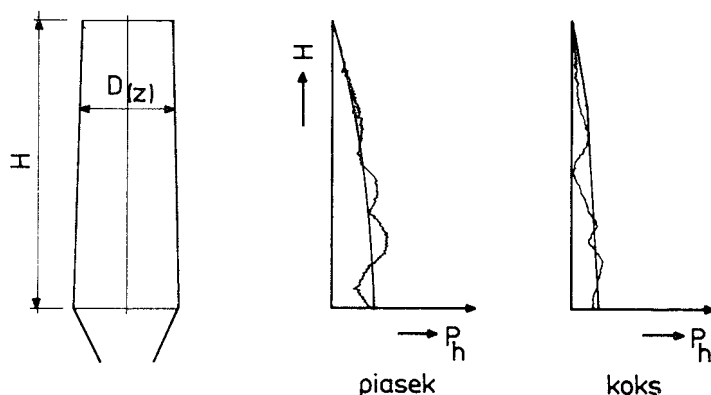
Warto podkreślić, że niewiele teoretycznych rozwiązań uwzględnia wpływ kształtu przekroju poziomego komory silosu na wartości i rozkład naporu materiału sypkiego. Te teorie, które wpływ ten ujmują, np. Lwina [91], dotyczą jedynie stanu napełniania komór.

4.3.2. Pochylenie ścian komory

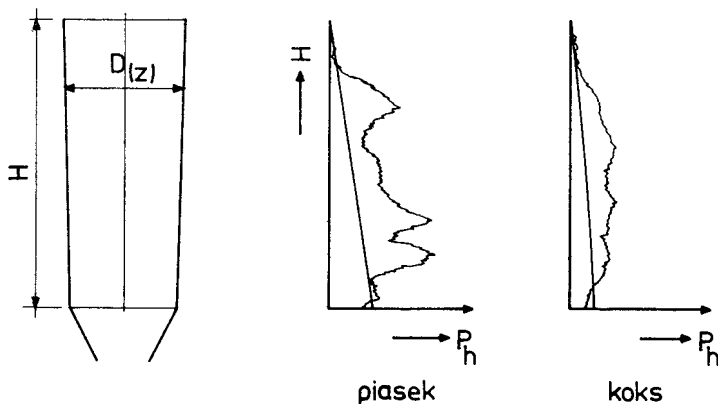
4.3.2.1. Wyniki badań eksperymentalnych

Znajomość wpływu pochylenia ścian komór silosowych na wartości naporu poziomego materiału sypkiego jest bardzo istotny dla praktyki. Ściany silosów mogą być wykonywane z pewnym pochyleniem w kierunku osi komory i wówczas mamy do czynienia ze zbieżnością komory ku górze, bądź też może wystąpić odchylenie górnych krawędzi ścian na zewnątrz i wówczas mówimy o rozbieżności komory. Przykłady budowy komór zbieżnych ku górze podali m.in. bracia Reimbertowie [140].

a) MODEL Z KOMORĄ ZBIEŻNĄ



b) MODEL Z KOMORĄ ROZBIEŻNĄ



Rys.4.30. Wykresy naporu poziomego materiału sypkiego w silosach o nieznacznym pochyleniu ścian [59]

Fig.4.30. Horizontal pressure of a bulk solid in silos with slightly inclined walls [60]

Wpływ nieznacznego pochylenia ścian silosu na zmianę wartości i rozkład naporu poziomego piasku i koksu badał Jenike i in. [59]. Ściany badanych modeli silosów były odchylone od pionu w jedną lub drugą stronę o kąt $0,5^\circ$. Dzięki pomiarom autorzy badań stwierdzili, że nieznaczna nachylenie ścian komory ku górze prowadzi do dużego zmniejszenia wartości naporu poziomego. Podczas opróżniania takiego silosu (rys.4.30a) wartości naporu poziomego oscylują wokół wartości naporu obliczonego ze wzorów Janssena dla stanu napełniania.

W silosie rożbieżnym (rys. 4.30b) pomierzone wartości naporu poziomego podczas opróżniania były prawie dwukrotnie wyższe aniżeli w modelu silosu ze zbieżnością ścian ku górze.

Pankratowa i Nagajcew [116] wykonali badania naporu piasku w modelu silosu ze ścianami zbieżnymi ku górze. Kąt odchylenia ścian od pionu wynosił 18° i był równy połowie kąta tarcia wewnętrznego piasku. Dodatkowo autorzy tych badań wykonali pomiary wartości naporu poziomego w modelu cylindrycznego silosu, którego pojemność komory była identyczna jak modelu ze ścianami zbieżnymi. Wyniki pomiarów zestawiono w tab. 4.15.

T a b e l a 4.15

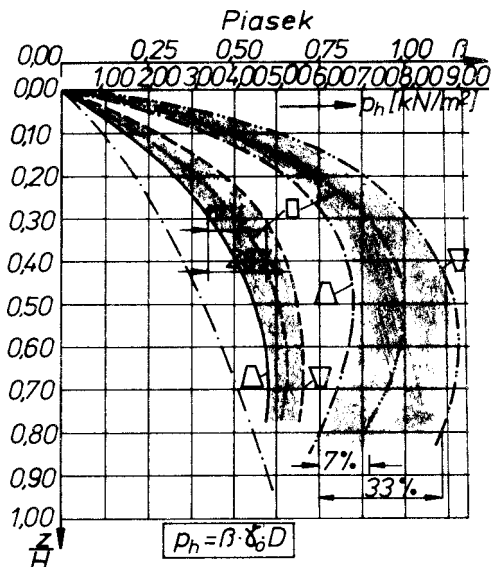
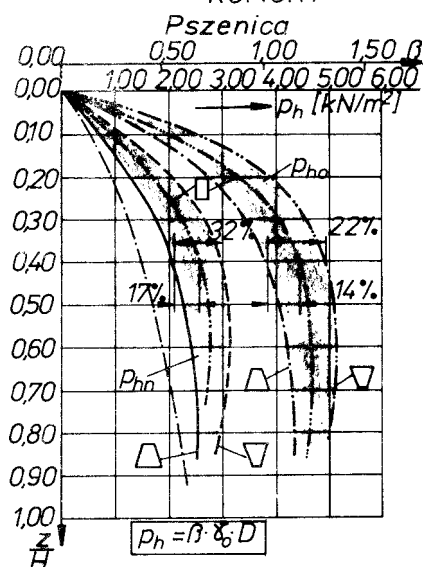
Wyniki badań Pankratowej i Nagajcewa

Poziom czujnika	Wartości poziomego naporu (N/m^2)			
	model cylindryczny		model z komorą zbieżną	
	p_{hn}	p_{ho}	p_{hn}	p_{ho}
1	318,0	712,3	139,9	318,0
2	89,0	305,2	89,0	127,2
3	254,4	559,6	152,6	254,4
4	152,6	343,4	114,4	267,1

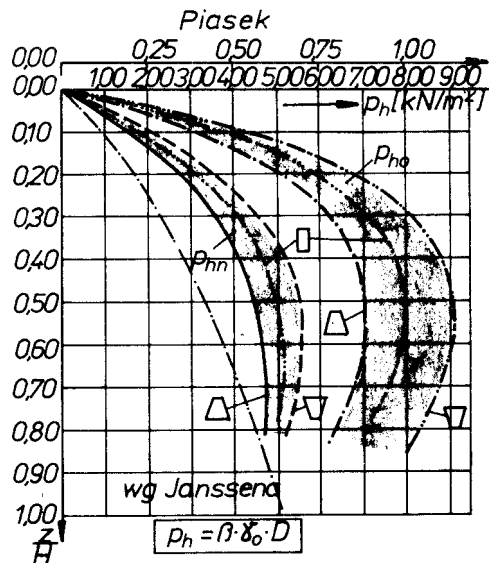
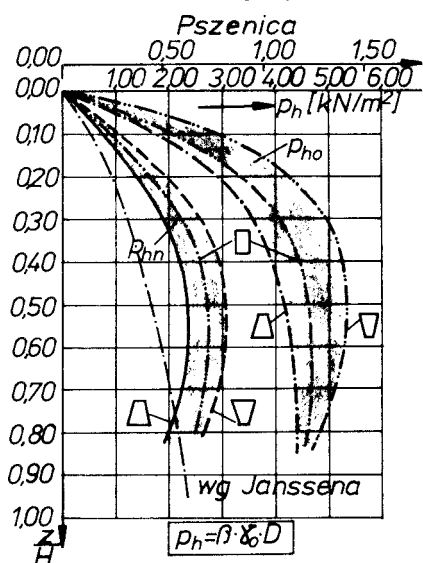
Wyniki te potwierdzają istnienie znacznego wpływu pochylenia ścian silosu na wartości naporu poziomego materiału sypkiego. W modelu silosu z komorą zbieżną zarówno w trakcie napełniania, jak i podczas opróżniania, zostały zarejestrowane bardzo małe wartości naporu poziomego, znacznie mniejsze aniżeli w komorze ze ścianami pionowymi. Po napełnieniu silosu dzięki pochyleniu ścian redukcja wartości naporu piasku wynosiła około 60%, natomiast wartości naporu podczas opróżniania były prawie 53% mniejsze niż wartości pomierzone w modelu z komorą cylindryczną.

Kamiński, Marcinkowski i Zubrzycki [69] rozszerzyli swoje badania o silosy ze skokową zbieżnością. Pomiary wartości naporu poziomego wykonano w pięciu modelach silosów o równej pojemności komór. Model podstawowy, do którego odnoszono wyniki pomiarów, miał cylindryczną komorę z pionowymi ścianami. W czterech pozostałych modelach silosów wystąpiła liniowa lub skokowa zmiana przekroju poziomego komory. Pochylenie lub odchylenie ścian od pionu było równe 1° . Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 4.31. Potwierdzają one w pełni istnienie wpływu pochylenia ścian na zmianę wartości naporu poziomego w silosach. Procentowe różnice w wartościach naporu, odniesione do naporu w modelu cylindrycznym, zestawiono w tab. 4.16.

a. LINIOWA ZMIANA POWIERZCHNI PRZĘKROJU
KOMORY



b. SKOKOWA ZMIANA POWIERZCHNI PRZĘKROJU
KOMORY



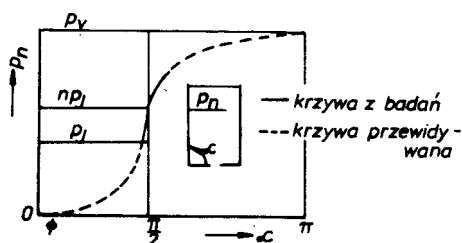
- - model cylindryczny
- △ - komora zbieżna ku górze
- ▽ - komora rozbieżna ku górze

Rys.4.31. Wykresy naporu poziomego w silosach ze ścianami komór odchylonymi od pionu o kąt 1° (badania Kamińskiego, Marcinkowskiego i Zubrzyckiego [69])

Fig.4.31. Horizontal pressure in silos with chamber walls out of plumb by an angle of 1° (Kamiński, Marcinkowski, Zubrzycki [69])

Procentowe różnice wartości naporu w silosach z pochyłymi ścianami w stosunku do komory cylindrycznej

Zmiany wartości naporu (%)							
redukcja naporu w komorze zbieżnej				wzrost naporu w komorze rozbieżnej			
pszenica		piasek		pszenica		piasek	
P_{hn}	P_{ho}	P_{hn}	P_{ho}	P_{hn}	P_{ho}	P_{hn}	P_{ho}
17	14	17	7	15	8	11	26



Rys.4.32. Wykres wpływu pochylenia ścian tworzących komory silosu na wartości naporu działającego prostopadłe do ściany [69]; p_y - napór wg Janssena

Fig.4.32. The effect of the pitching of silo walls generating line on the value of pressure acting perpendicularly to the wall [69], p_y - pressure acc. to Janssen

wszystkim z braku możliwości zagęszczania się materiału sypkiego w kierunku poziomym.

Do wyznaczenia składowych naporu przyjęto następujące założenia:

1. Rozpatrywane są warunki równowagi elementarnej warstwy materiału sypkiego grubości dz na głębokości z .
2. Rozkład naporu poziomego i pionowego jest stały w przekroju komory, a ich iloraz przyjmuje się w następującej postaci:

$$\frac{P_h}{P_v} = k.$$

3. Na styku ściany i materiału sypkiego istnieje warunek ograniczający wartość naporu stycznego w następującej postaci:

$$P_t = P_n \operatorname{tg} \phi_s.$$

Opierając się na wynikach badań, Kamiński, Marcinkowski i Zubrzycki określili funkcję wpływu pochylenia ścian w postaci wykresu przedstawionego na rys.4.32.

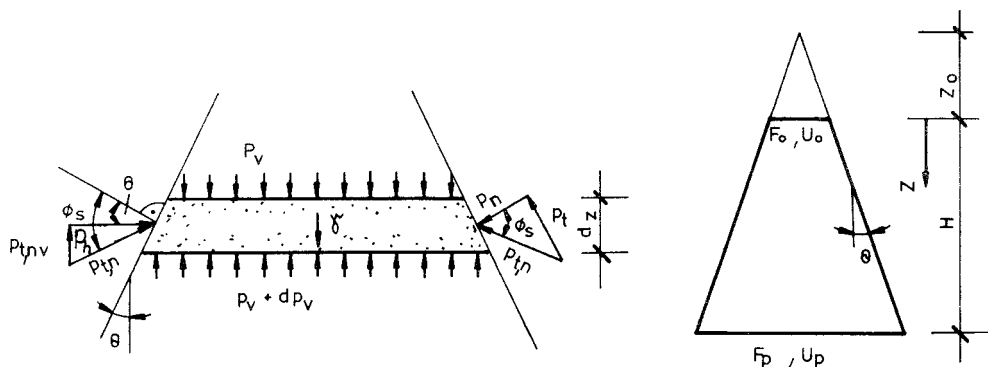
4.3.2.2. Teoretyczne wyznaczenie obciążeń ścian w silosie zbieżnym ku górze

W materiale sypkim, znajdującym się w komorze silosu ze ścianami pochyłymi w kierunku jej osi, zarówno w trakcie napełniania, jak i opróżniania, występuje wyłącznie aktywny stan naprężeń. Stan ten wynika przede

4. Zagadnienie traktuje się jako quasi-statyczne, w związku z czym można pominąć wpływ sił bezwładności.

Przyjęcie stałego rozkładu naporu w przekroju komory jest wystarczająco poprawne. Między innymi w pracach [118 i 132] wykazano, że przyjęcie zmiennego rozkładu naporu pionowego nie zmienia w istotnym stopniu wyników obliczeń.

Na podstawie warunku 3 zastąpiono oddziaływania p_t i p_n wypadkową $p_{t,n}$, odchyloną o kąt ϕ_s od linii prostopadłej do ściany komory (rys.4.33).



Rys.4.33. Schemat sił działających na elementarną warstwę materiału sypkiego w komorze silosu zbieżnego

Fig.4.33. Forces acting on the elementary layer of a bulk solid in the chamber of a convergent silo

Z warunku równowagi elementarnej warstwy materiału sypkiego o obwodzie U na głębokości z otrzymuje się następujące równanie:

$$\gamma F dz + F p_v = F p_v + F dp_v + p_v dF + dF dp_v + U p_{tnv} \frac{1}{\cos \theta dz}, \quad (4.4)$$

po podstawieniu

$$p_{tnv} = p_h \operatorname{tg}(\phi_s - \theta) = k p_v \operatorname{tg}(\phi_s - \theta)$$

oraz

$$dF = U_{dz} \operatorname{tg} \theta$$

i pominięciu różniczki małego rzędu, otrzymamy

$$\left(\gamma F - U p_v \operatorname{tg} \theta - U p_v k \frac{\operatorname{tg}(\phi_s - \theta)}{\cos \theta} \right) dz = F dp_v. \quad (4.5)$$

Zależność między polem przekroju F i obwodem U na dowolnej głębokości z a polem przekroju F_p i obwodu U_p u podstawy komory silosu wyraża się związkiem:

$$\frac{U}{F} = \frac{U_p}{F_p} \frac{H+z_0}{z_0+z} \quad (4.6)$$

Po wprowadzeniu bezwymiarowego parametru

$$A = \frac{U_p}{F_p} (H + z_0) \left(\operatorname{tg} \theta + k \frac{\operatorname{tg}(\phi_s - \theta)}{\cos \theta} \right) \quad (4.7)$$

otrzymuje się zależność (4.5) w postaci:

$$\frac{dp_v}{dz} + \frac{A}{z+z_0} p_v - \gamma = 0. \quad (4.8)$$

Po rozwiązaniu równania różniczkowego dla warunku brzegowego $z = 0 \rightarrow p_v = 0$ otrzymuje się następujące wyrażenie naporu pionowego:

$$p_v = \frac{\gamma(z+z_0)}{A+1} \left[1 - \left(\frac{z_0}{z+z_0} \right)^{A+1} \right]. \quad (4.9)$$

Z założenia 2 oraz z zależności wynikających z rys. 4.31 otrzymujemy:

$$p_h = \frac{\gamma k(z+z_0)}{A+1} \left[1 - \left(\frac{z_0}{z+z_0} \right)^{A+1} \right], \quad (4.10)$$

$$p_n = \frac{\gamma k(z+z_0)}{A+1} \left[1 - \left(\frac{z_0}{z+z_0} \right)^{A+1} \right] \frac{\cos \phi_s}{\cos(\phi_s - \theta)}, \quad (4.11)$$

$$p_t = \frac{\gamma k(z+z_0)}{A+1} \left[1 - \left(\frac{z_0}{z+z_0} \right)^{A+1} \right] \frac{\sin \phi_s}{\cos(\phi_s - \theta)}. \quad (4.12)$$

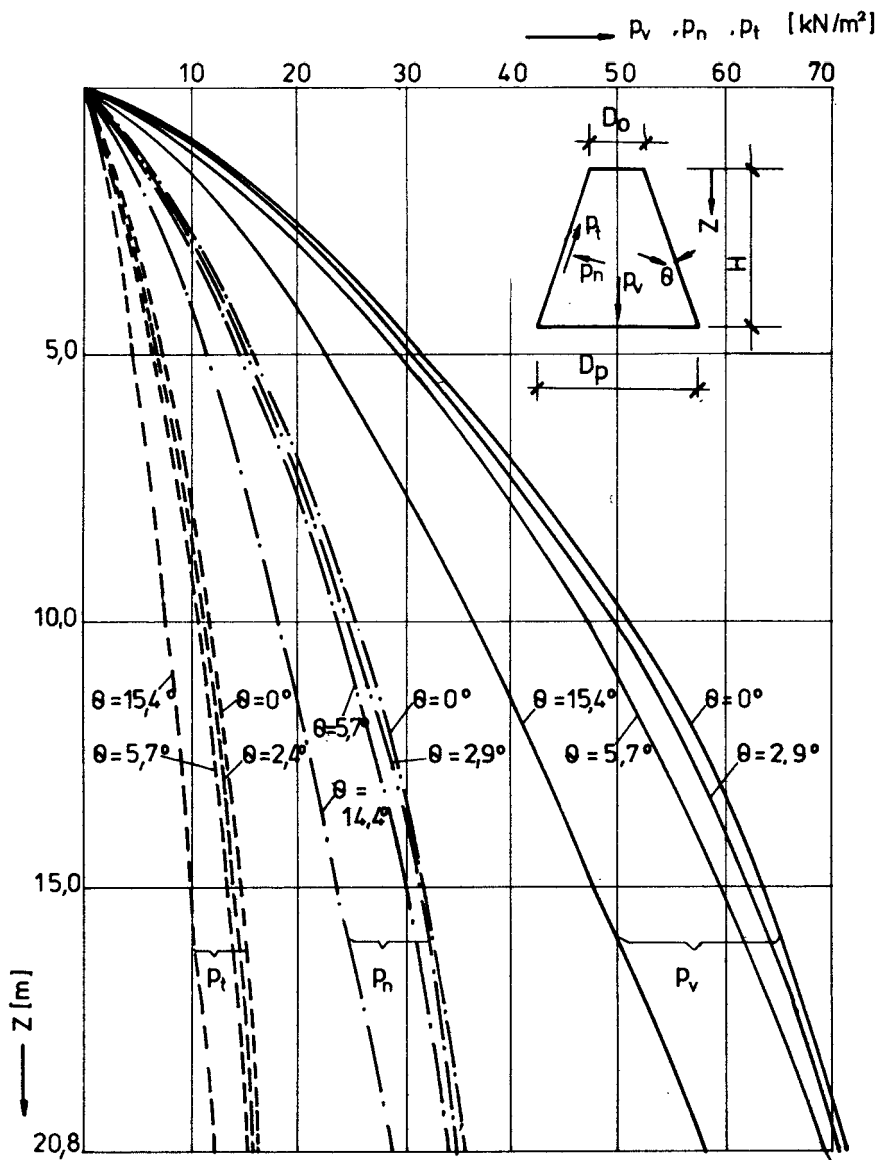
Wprowadzone wzory są ważne dla

$$0 < \theta < \phi_s.$$

T a b e l a 4.17

Geometryczne parametry analizowanych silosów zbieżnych ku górze

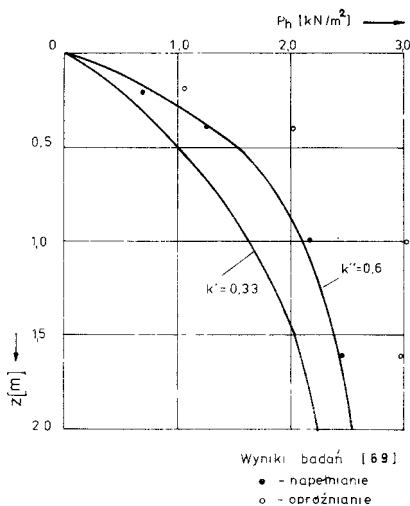
Nr silosu	Średnica podstawy D_p (m)	Średnica górna D_o (m)	Wysokość komory H (m)	Kąt pochylenia (°)
1	11,0	9,0	20,0	2,9
2	12,0	8,0	20,0	5,7
3	15,0	4,0	20,0	15,4



Rys.4.34. Teoretyczne wykresy naporu pszenicy w zależności od pochylenia ścian silosu

Fig.4.34. Theoretical wheat pressures in the function of silo wall batter

Wykorzystując wyrażenia (4.9)-(4.12) na rys. 4.34 przedstawiono wykresy naporu pszenicy w trzech silosach o identycznych pojemnościach, lecz różnych pochyleniach ścian. Cechy fizyczne pszenicy wynoszą: $\gamma = 8,0 \text{ kN/m}^3$,



Rys.4.35. Porównanie wyników obliczeń teoretycznych z pomiarami [56]

Fig.4.35.Theoretical vs. experimental results [56]

ze wraz ze zwiększaniem kąta θ maleją wartości naporu p_v , p_n i p_t . Pomimo, że jednostkowy napór p_v również maleje, jednak z uwagi na szybkie zwiększanie się powierzchni podstawy komory globalne obciążenie dna ($Q = p_v F_p$) przyjmuje wartość maksymalną dla największego kąta θ . Procentowe wartości obciążenia globalnego przypadającego na dno w stosunku do całkowitego ciężaru pszenicy wypełniającej komorę wynoszą:

- dla $\theta = 0^\circ$ - 44,7%
- dla $\theta = 2,9^\circ$ - 53,6%
- dla $\theta = 5,7^\circ$ - 62,6%
- dla $\theta = 15,4^\circ$ - 82,9%.

Pozostała część ciężaru pszenicy przekazuje się przez tarcie na ściany analizowanych komór. Porównanie wyników obliczeń z pomiarami [69] przedstawiono na rys. 4.35.

Wykresy z obliczeń teoretycznych dla $k'' = 0,6$ wykazują bardzo dobrą zgodność z pomiarami wykonanymi po napełnieniu komory silosu. Doświadczalne wartości naporu opróżniania są większe od obliczonych prawie 30%. Spowodowane jest to m.in. możliwością powstawania sklepień na wewnętrznych nierównościach ściany badanego modelu. Dlatego w celach praktycznych obliczeń do wzorów (4.7) i (4.8) należy zastosować współczynnik wzrostu naporu $n = 1,3$.

$\phi_u = 30^\circ$, $\phi_s = 25^\circ$. Geometryczne parametry analizowanych komór zestawiono w tab. 4.17.

Do celów porównawczych wykonano również obliczenia wartości naporu ze wzorów (3.9)-(3.11) w silosie cylindrycznym o pojemności odpowiadającej analizowanym silosom zbieżnym ku górze. Średnica silosu cylindrycznego wynosi 10 m, a jego wysokość 20 m.

Założywszy, że w silosie zbieżnym może panować w trakcie napełniania i opróżniania jedynie czynny stan naprężeń, przyjęto za pracami [18 i 106] wartość współczynnika naporu $k = 1 - \sin \phi_u = 0,5$. Wartość ta zawiera się między granicznymi wartościami k' i k'' określonymi przez Dąbrowskiego [19] dla czynnego stanu naprężeń.

Z wykresów na rys. 4.34 widać,

4.3.3. Pochylenie ścian leża

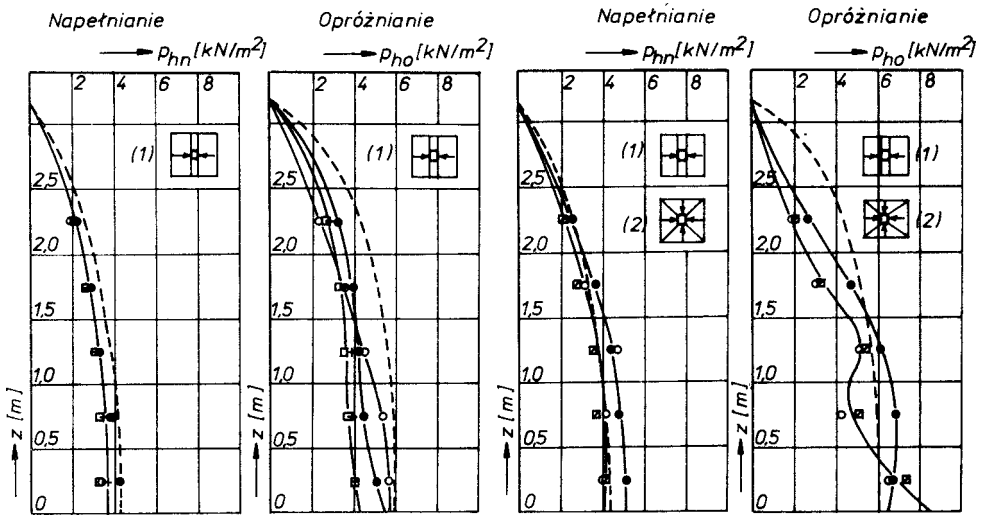
Wpływ kształtu dna silosu na wartości naporu materiału sypkiego m.in. badany był przez Motzkusa [94] i Fresego [34].

Motzkus mierzył wartości naporu piasku i pszenicy w modelu kwadratowego silosu, którego komora mogła mieć dno płaskie lub leże o różnym pochyleniu ścian. Wymiary przekroju silosu poziomego wynosiły 1,0 x 1,0 m, a wysokość komory była równa 4,50 m. Wartości cech fizyko-mechanicznych zastosowanych materiałów sypkich w stanie luźnym i zagęszczonym wynosiły:

- piasek:
 - ciężar objętościowy 15,70-16,50 kN/m³
 - kąt tarcia wewnętrznego 33-41°
 - kąt tarcia o ścianę 25-33°
- pszenica
 - ciężar objętościowy 8,3-16,50 kN/m³
 - kąt tarcia wewnętrznego 30-38°
 - kąt tarcia o ścianę 18-25°.

SZORSTKIE ŚCIANY

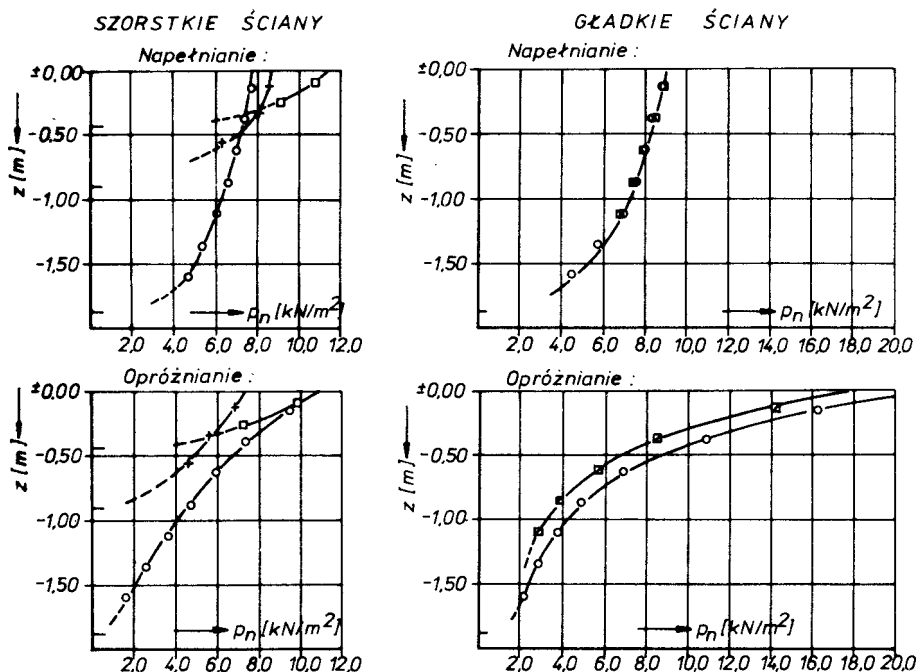
GŁADKIE ŚCIANY



Oznaczenia: +- p_h wg DIN 1055, -o- dno płaskie, -o- dno wg schematu (1) $\angle 75^\circ$,
 +- dno wg sch. (1) $\angle 61^\circ$, -□- dno wg sch. (1) $\angle 41^\circ$,
 -□- dno wg sch. (2) $\angle 75^\circ$

Rys.4.36. Wykresy naporu poziomego pszenicy w modelu kwadratowego silosu wyposażonego w różne dna [94]

Fig.4.36. Wheat horizontal pressures in the model of a square silo with different replacable floors



Rys.4.37. Wykresy naporu pszenicy na ściany lejów o różnym pochyleniu ścianek [94]; oznaczenia krzywych wg rys. 4.33
Fig.4.37. Wheat pressures on the walls of hoppers of different steepness [94], curves acc. to fig. 4.33

Wyniki badań Motzkusa przedstawiono na rys. 4.36 i 4.37. Z pomiarów Motzkusa wynika, że w komorze wyposażonej w lej wartości naporu poziomego działające po napełnieniu silosu nie zależą praktycznie od wartości kąta pochylenia ścianek tego leja. Zastosowanie płaskiego dna w komorze z gładkimi ścianami wywołało zwiększenie wartości naporu poziomego prawie 20%.

Wyraźniejszy wpływ kształtu dna komory na wartości naporu poziomego był widoczny podczas opróżniania. Wartości tego naporu, w znacznie większym stopniu aniżeli w trakcie napełniania, zależą od pochylenia ścianek leja. Różnice w wartościach naporu pszenicy dochodzą do 35%. W gładkich ścianach komory zastosowanie leja o pochyleniu ścianek 75° do poziomu wywoływało podczas opróżniania skoncentrowane działanie naporu o dużej wartości w miejscu połączenia leja ze ścianą. Podobnie do pszenicy - w zależności od kształtu dna - zmieniał swe oddziaływanie piasek.

Kształt dna silosu wpływa również na usytuowanie miejsca maksymalnego wzrostu naporu poziomego podczas opróżniania. Maksymalne wartości współczynnika zmiany naporu w trakcie opróżniania zestawiono w tab.4.18.

T a b e l a 4.18

Maksymalne wartości współczynnika zmiany naporu
poziomego podczas opróżniania silosu [94]

Pochylenie ścianek dna	Piasek		Pszenica			
	max ($p_{ho}:p_{hn}$)	poziom max p_{ho} (m)	szorstkie ściany		gładkie ściany	
			max ($p_{ho}:p_{hn}$)	poziom max p_{ho} (m)	max ($p_{ho}:p_{hn}$)	poziom max p_{ho} (m)
0°	1,25	+1,25	1,35	±0,0	1,45	+0,75
41°	1,35	+1,75	1,20	±0,0	-	-
61°	1,50	+1,50	1,20	±0,0	-	-
75°	1,35	+0,75	1,65	±0,0	1,80	0,00

± 0,0 - poziom górnej krawędzi leja lub poziom płaskiego dna modelu silosu

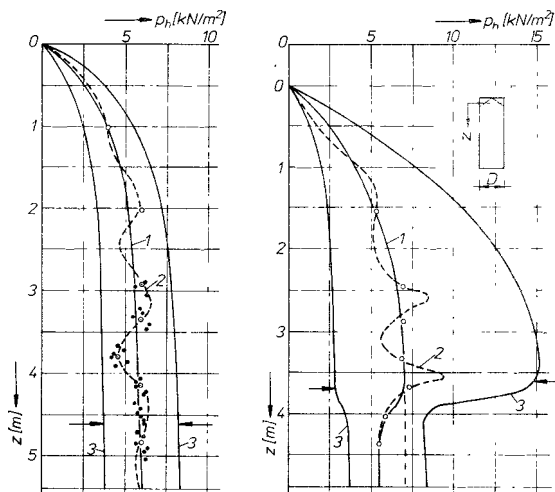
Generalnie należy stwierdzić, iż w badaniach Motzkusa najwyższe wzrosty naporu poziomego podczas opróżniania wystąpiły w modelu silosu o dużym kącie pochylenia ścian (61 lub 75°). Zarówno w przypadku piasku, jak i pszenicy w komorze z gładkimi ścianami maksymalny wzrost naporu poziomego występował najbliżej krawędzi leja. Zjawisko to związane jest ze zmianą rodzaju przepływu materiału sypkiego z rdzeniowego na masowy.

Frese [34] badał rozkład naporu piasku na ściany i dno modelu cylindrycznego silosu o średnicy 0,78 m i wysokości 6,00 m. Komora modelu mogła być wyposażona w dno płaskie albo w lej, którego ściany nachylone były do poziomu pod kątem 77°.

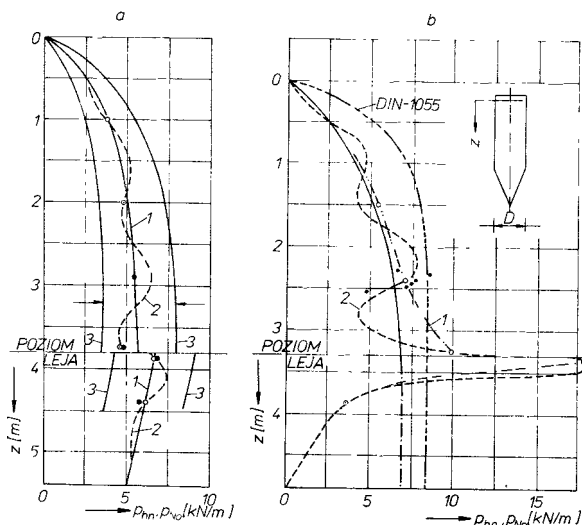
Ekstremalne wartości cech fizycznych piasku z uwzględnieniem stopnia zagęszczenia oraz stanów spoczynku i ruchu wynosiły:

- ciężar objętościowy 14,51-16,51 kN/m³
- kąt tarcia wewnętrznego 27,6°-57,8°
- kąt tarcia o ścianę 23,1°-25,8°.

Wartości naporu poziomego pomierzone przez Fresego wykazywały znaczne odchylenie od wartości średnich. Po napełnieniu modelu silosu bez względu na kształt dna, wartości naporu poziomego i jego rozkład były do siebie zbliżone (rys.4.38 i 4.39). Dopiero podczas opróżniania (podobnie jak w badaniach Motzkusa) zaznaczył się wyraźny wpływ kształtu dna na wartości pomierzonego naporu. W modelu z płaskim dnem największy wzrost wartości naporu poziomego wystąpił w środkowej strefie silosu. W dolnej części komory z powodu występowania tzw. martwych stref materiału sypkiego nie zarejestrowano żadnego zwiększenia wartości naporu (rys.4.38b).



Rys.4.38. Wykresy naporu poziomego piasku w komorze modelu silosu z płaskim dnem [34]: 1 - wartości średnie, 2 - możliwy przebieg wykresu, 3 - granice obszaru rozrzutu mierzonych wartości
Fig.4.38. Sand horizontal pressures in the chamber of the model of a silo with a flat floor [34], 1 - mean values, 2 - possible course of the curve, 3 - scatter band limits of the quantities measured

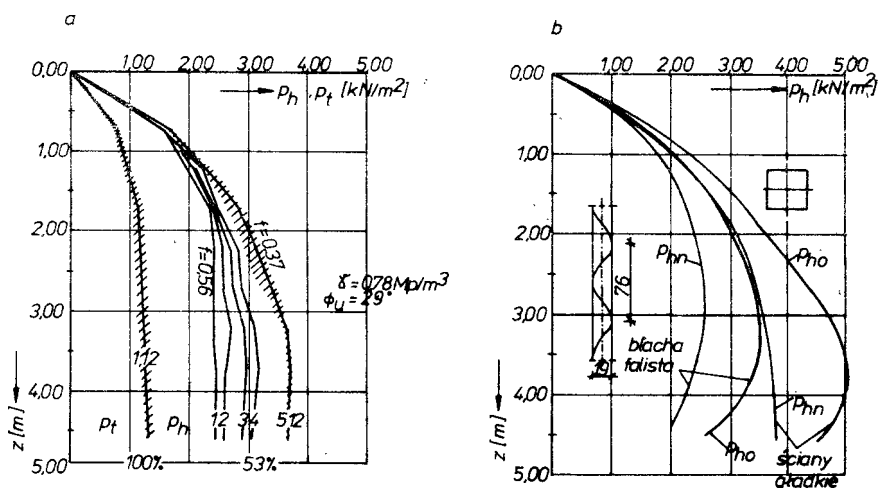


Rys.4.39. Wykresy naporu poziomego piasku w komorze modelu silosu ze stożkowym lejem (♠ 770) [34]: 1 - uśredniona krzywa naporu, 2 - możliwy przebieg wykresu, 3 - obszar rozrzutu mierzonych wartości
Fig.4.39. Sand horizontal pressures in the chamber of the model of a silo with a cone hopper (♠ 770), [34], 1 - averaged pressure curve, 2 - possible course of the curve, 3 - scatter band limits of the quantities measured

Podczas opróżniania modelu z lejem stożkowym zmieniły się wartości, a także rozkład naporu poziomego. W miejscu połączenia ścian z lejem wystąpił maksymalny wzrost naporu poziomego (rys.4.39). Wyniki badań naporu piasku potwierdził Frese przez wykonanie pomiarów naporu pszenicy w komorze wyposażonej w lej stożkowy.

4.4. Szorstkość ścian komory

Szorstkość wewnętrznej powierzchni ścian komory silosu ma bardzo duży wpływ zarówno na rozkład, jak i wartości poziomego materiału sypkiego. Wpływ ten objawia się szczególnie wyraźnie w wartościach naporu mierzonego na dużych głębokościach komory. Szorstkość ścian wyraża się wartością współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę. Jego wartości zależą od tego, czy materiał sypki znajduje się w ruchu czy w spoczynku. Podczas opróżniania silosu wartości współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę ulegają zmniejszeniu. Zjawisko to objawia się w postaci wzrostu wartości naporu poziomego działającego na ściany komory, któremu jednocześnie towarzyszy spadek naporu na dno.



Rys.4.40. Wykresy naporu jęczmienia w modelach silosów o różnej szorstkości ścian komory [98]: a - zmiany naporu wskutek wygładzania ściany przez jęczmień w kolejnych pomiarach, b - wykresy naporu w modelu ze ścianami gładkimi i ze ścianami wykonanymi z blachy falistej

Fig.4.40. Barley pressures in the models of silos of different chamber wall roughness [127]: a - changes of pressure due to smoothing of the wall of the chamber by flowing barley during successive measurements, b - pressures in the model with smooth walls and in the model with the walls made of corrugated sheet

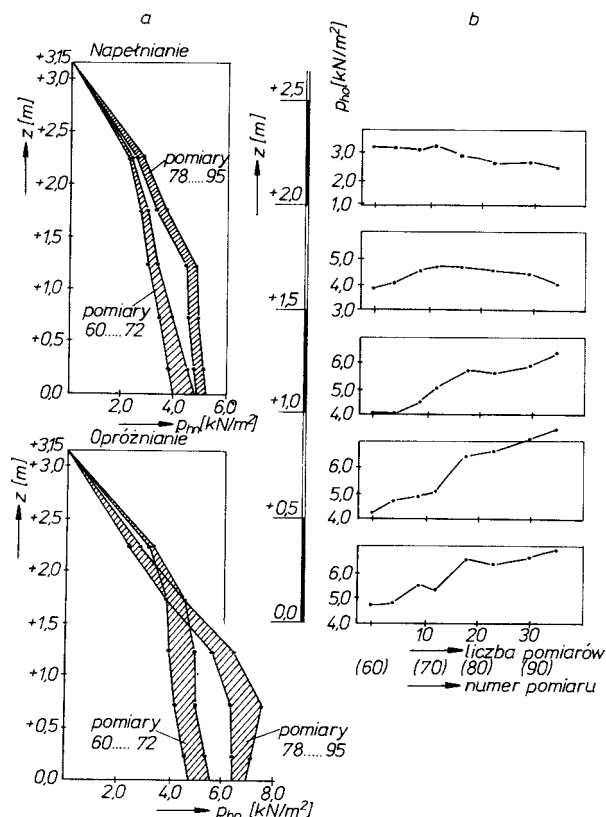
Podobnie wpływają na zmianę wartości naporu różnice w naturalnej szorstkości ścian. W komorze ze ścianami o podwyższonej szorstkości, np. z uźebrowaniem lub wykonanych z blachy falistej, wartości naporu poziomego są znacznie niższe aniżeli wtedy, gdy ściany silosu są gładkie.

Pieper [127] opisuje wyniki badań, w ramach których wykonano pomiary naporu jęczmienia browarnego w modelach silosów o różnej szerokości ścian. Na rysunku 4.40 przedstawiono wykresy naporu poziomego i stycznego w modelu silosu z drewnianej sklejki, której szorstkość zmieniała się na skutek wygładzenia jej powierzchni przez ziarno jęczmienia. Gdy współczynnik tarcia wynosił $f = 0,56$, w pierwszym pomiarze wartości naporu poziomego były najmniejsze. Wskutek zmniejszania się wartości współczynnika tarcia w następnych pomiarach ulegały zwiększeniu wartości naporu poziomego. Wzrost ten rejestrowany był do momentu, gdy ściana uzyskała największą gładkość ($f = 0,37$ po 12. pomiarze). Różnice wartości naporu poziomego przy zmianie współczynnika tarcia w granicach od 0,56 do 0,37 wynosiły aż 53%. Podobnie zmieniały się wartości naporu poziomego podczas opróżniania. Zmiana szorstkości ściany jedynie nieznacznie wpływała na zmianę wartości naporu stycznego.

Przedstawione przez Piepera wyniki badań mają duże znaczenie dla praktyki projektowej. Zmiana wartości współczynnika tarcia materiału sypkiego dzięki wygładzaniu się ścian może występować także w komorach żelbetowych silosów w skali naturalnej. Z tego też powodu należałoby w obliczeniach naporu przyjąć najniższą możliwą wartość współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę.

Wpływ dużej różnicy szorstkości naturalnej ścian modelu silosu można prześledzić na wykresach przedstawionych na rys. 4.40b. Są to wyniki pomiarów wykonanych na dwóch modelach o identycznej pojemności, lecz posiadających ściany o różnej szorstkości, wynikającej z zastosowania blachy falistej lub drewnianej sklejki. Wartości naporu poziomego jęczmienia na falistą blachę (duża szorstkość) po napełnieniu silosu były bardzo małe. Podczas opróżniania nastąpił wzrost naporu, lecz jego maksymalne wartości dorównywały zaledwie wartościom naporu pomierzonego po napełnieniu modelu silosu z komorą wykonaną ze sklejki (ściany gładkie).

Wygładzanie się ścian wraz ze wzrostem liczby napełnień i opróżnień stwierdził również Motzkus [94] po zbadaniu naporu pszenicy. Wyniki jego pomiarów przedstawiono na rys. 4.41. Wykresy na rys. 4.41a ilustrują zmianę rozkładu naporu poziomego pszenicy w dwóch różnych seriach pomiarów. Wartości naporu poziomego po napełnieniu silosu ulegają zwiększeniu wraz ze zmniejszeniem się szorstkości ścian. Motzkus podczas opróżniania obserwował, oprócz zmiany wartości naporu poziomego, także zmianę charakteru jego rozkładu. W górnej strefie silosu po zwiększeniu się gładkości ścian nastąpiło zmniejszenie wartości naporu. W niższej



Rys.4.41. Wpływ efektu wygładzenia ścian przez pszenicę na zmianę wartości naporu poziomego [94]: a - wykresy naporu pszenicy dla dwóch różnych serii pomiarów, b - wykresy zmiany wartości naporu poziomego na różnych poziomach komory w zależności od liczby pomiarów

Fig.4.41. The effect of smoothing of the walls by flowing wheat on the changes in horizontal pressure [94]: a - wheat pressures for two series of measurements, b - changes in horizontal pressure at different heights of the chamber in the function of the number of measurements made

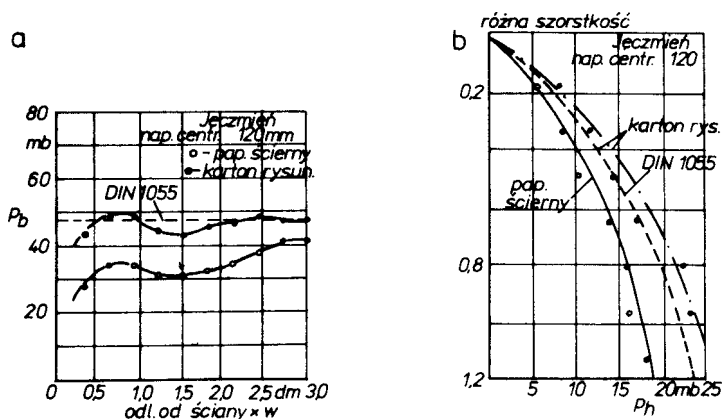
strefie komory wartości naporu poziomego zwiększyły się (rys.4.41b). Przy ścianach maksymalnie wygładzonych (po 95 pomiarach) największe wartości naporu poziomego występowały na poziomie odpowiadającym 1/3 wysokości komory. Różnice między maksymalną wartością naporu w pierwszym pomiarze a maksymalną jego wartością w 95. cyklu wynosiły około 80%.

Warto podkreślić, że wygładzanie się ścian stwierdzone zostało dotychczas jedynie dla różnych gatunków zbóż. W badaniach Motzkuśa napór piasku po kilkudziesięciu pomiarach był bardzo zbliżony do wartości na-

poru występującego w pierwszym cyklu napełniania i opróżniania modelu. Stąd też wygładzanie się ścian zależy musi od ściernalnych właściwości samego materiału sypkiego, związanych z wydzielaniem substancji zmniejszających tarcie.

Badania dotyczące skutków ścierności różnych zbóż prowadzili m.in. Niethammer i Tietz [108]. Wskutek wygładzania się ścian zmienia się obraz przepływu materiału sypkiego. Jak wykazano, z rodzajem przepływu związany jest ściśle charakter rozkładu naporu poziomego.

Gdy ściany są szorstkie, występuje przepływ rdzeniowy. W tym samym silosie po wygładzeniu się ścian ruch materiału sypkiego przejawia cechy przepływu masowego, któremu towarzyszy skoncentrowane działanie naporu poziomego o znacznych wartościach. Wpływ szorstkości ścian silosu na obraz przepływu zboża badali Kamiński i Zubrzycki [61], stosując do obserwacji aparaturę rentgenowską.

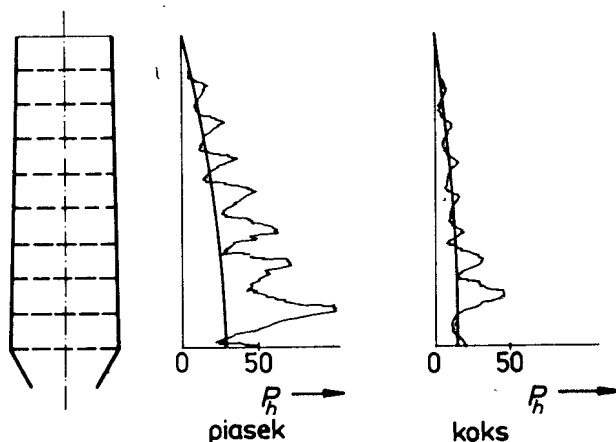


Rys.4.42. Wyniki badań Paula [88]: a - wykresy naporu na dno silosu, b - wykresy naporu poziomego w przekroju pionowym komory
Fig.4.42. Results obtained by Paul [117]: a - pressures acting on the floor of a silo, b - horizontal pressures a cross the vertical section of a chamber

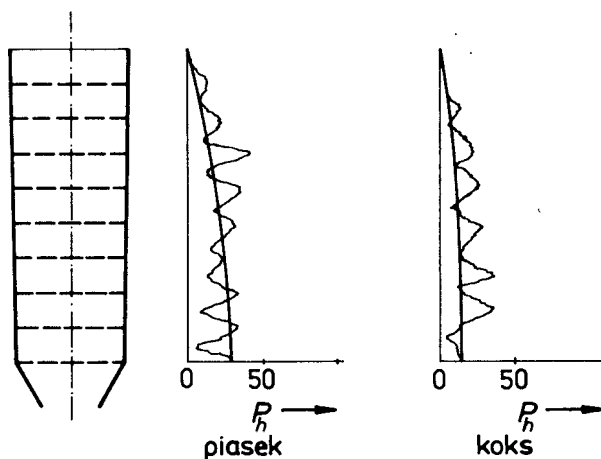
Paul [117] badał wpływ szorstkości ścian na wartość naporu jęczmienia działającego na ściany i dno modelu silosu o średnicy 60 cm i wysokości 120 cm. Ściany modelu wyklejone były od wewnątrz gładkim kartonem lub papierem ściernym. Komora silosu napełniana była centralnie przez otwór zasypowy o średnicy 120 mm. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów (rys. 4.42) sformułowano następujące wnioski:

- napór poziomy jęczmienia po napełnieniu silosu przyjmuje większe wartości, gdy ściany są gładkie (wyklejone kartonem),
- wartość naporu jęczmienia na dno komory jest większa, gdy ściany są gładkie.

a). Model z komorą zbieżną



b). Model z komorą rozbieżną



Rys.4.43. Wpływ szorstkości ścian komory w silosach z niewielkim pochyleniem ścian [59]: a - wykresy naporu poziomego w komorze zbieżnej, b - wykresy naporu poziomego w komorze rozbieżnej
 Fig.4.43. The effect of wall roughness in silos with a slight inclination of the walls: a - horizontal pressures in a convergent chamber, b - horizontal pressures in a divergent chamber

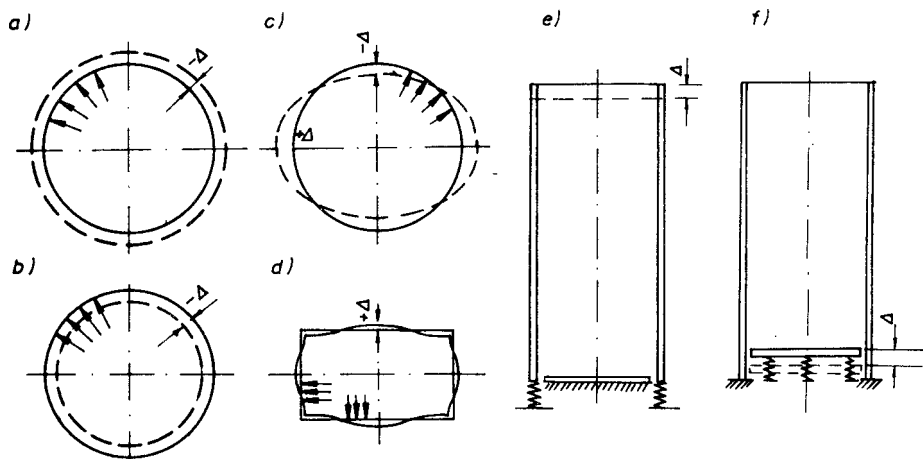
Wpływ szorstkości określił również Jenike i in. [59] na podstawie pomiarów w modelach silosów z pochyłymi ścianami (rys.4.43). Badania te wykazały, że w komorze ze zbieżnością przekroju ku górze wewnętrzne żebra wywoływały podczas opróżniania zwiększenie wartości naporu pozi-

meo w porównaniu do gładkich ścian. W modelu z komorą rozbieżną wewnętrzną żebra przyczyniały się do znacznego zredukowania wartości naporu poziomego materiału sypkiego.

4.5. Podatność ścian i dna

4.5.1. Wyniki badań eksperymentalnych

Zależność rozkładu i wartości naporu materiału sypkiego od wielkości przemieszczeń elementów konstrukcji ścian i den silosów udowodniono została na podstawie licznych badań eksperymentalnych.



Rys. 4.44. Schematy odkształceń konstrukcji komór silosów
Fig. 4.44. Strain curves of silo chambers

Ściany i dno silosu mogą przemieszczać się zgodnie z kierunkiem działania naporu materiału sypkiego, bądź też w przeciwnym kierunku. W przypadku pierwszym mamy do czynienia z naporem czynnym, w przypadku drugim zaś - z naporem biernym. Przemieszczenia ściany i dna mogą być związane z naturalną podatnością konstrukcji lub też mogą zostać wymuszone przez działanie innych czynników zewnętrznych, tak jak zmiany temperatury lub nierównomierne osiadanie fundamentów. Schematy możliwych odkształceń konstrukcji komór silosów przedstawiono na rys. 4.44.

W ramach dotychczasowych badań wykonano pomiary wartości naporu różnych materiałów sypkich w modelach silosów oraz na obiektach w skali naturalnej. Podstawowe informacje dotyczące wybranych wyników badań zamieszczono w tab. 4.19.

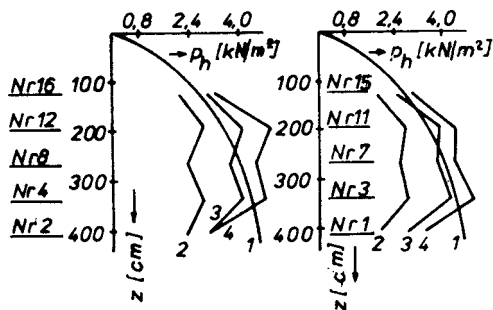
Iwanow i in. [52] zbadali dwa modele silosów z wymuszoną oraz naturalną podatnością ścian. Model z wymuszoną podatnością (średnica $\varnothing$ 30 cm i wysokość 150 cm) ustawiony był na podatnej ramie stalowej,

T a b e l a 4.19

Zestawienie badań wpływu podatności konstrukcji silosów na wartość
i rozkład naporu materiału sypkiego

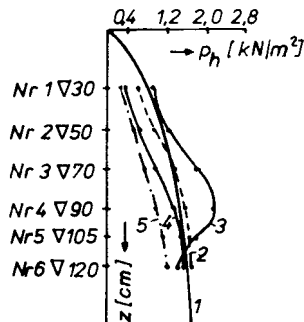
Autor	Rok	Obiekt wymiary przekro- ju komo- ry D lub a·b (m)	Wysokość komory H (m)	Napór na ele- ment konstruk- cji i kierunek przemieszczeń	Rodzaj naporu (czyn- ny lub bierny)	Rodzaj materia- łu syp- kiego
Berdičevski i in. [5]	1975	Ø 6,0 (bete- ria 8x6)	28,35	ściana, prze- sów poziomy naturalny	napór czynny	pszeni- ca
Ivanov i in. [52]	1974	Ø 0,3	1,50	ściana, prze- sów poziomy wymuszony	napór czynny	pszeni- ca
Ivanov i in. [52]	1974	Ø 1,0	4,60	ściana, prze- sów poziomy naturalny	napór czynny	pszeni- ca
Platonov i in. [133]	1975	Ø 6, 16	30,0	ściana, prze- sów poziomy naturalny	napór czynny	pszeni- ca
Lightfood/ Saman [89]	-	0,46 x x 0,46 (blok 2 ko- mór)	1,37	ściana, prze- sów poziomy	napór bierny	pia- sek
Kuročkin [86]	1981	Ø 0,25	1,5	ściana, poda- tność lokal- na w kierun- ku poziomym	napór czynny	psze- nica
Jahns [54]	1960	2 x 00x x0,30	6,0	dno, przesuw pionowy	napór czynny	żwir pereł- kowy sorto- wany
Lenczner [88]	1963	Ø 0,254	1,52	ściana, prze- sów pionowy, sprężyste i sztywne podparcie	napór czynny, bierny	żwir piasek

a-b) IVANOV i inni [52]



a) model z naturalną podatnością ścian

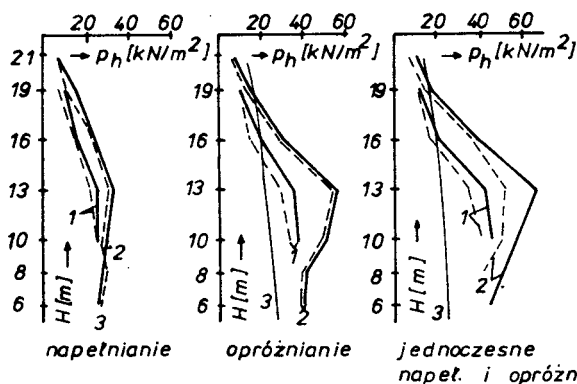
- 1 - wg Janssena 2 - napełnianie
3 - opróżnianie 4 - jednoczesne napełnianie i opróżnianie



b) model z wymuszoną podatnością ścian

- 1 - wg Janssena, $k \cdot \tan^2(45 - 0.5\phi_u)$
2 - napełnianie
3 - opróżnianie
4, 5 - zwiększone podatności ścian

c) BERDIČEVSKI i inni [5]



- 1 - napór na pilastrach
2 - napór na ścianę między pilastrami
3 - wg Janssena $k \cdot \tan^2(45 - 0.5\phi_u)$

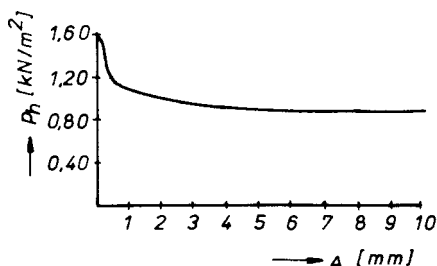
Komory sąsiednie:
— napełnione
--- puste

Rys.4.45. Wykresy naporu poziomego materiału sypkiego w silosach o różnej podatności ścian komory

Fig.4.45. Horizontal pressure of a bulk solid in silos of different chamber wall flexibility

umożliwiającej pionowe przemieszczenie się silosu pod wpływem zmiany poziomu materiału sypkiego w komorze. Komora modelu złożona była z dwóch półwalców połączonych z klinowym urządzeniem rozsuwu, umożliwiającym synchroniczną zmianę pionowych ugięć ramy na poziomie przemieszczenia poziomów ścian w przeciwnych kierunkach. Wartości przemieszczeń ścian wynosiły od kilku mikronów do 20 mm. Komorę modelu silosu obciążano pszenicą, której ciężar objętościowy wynosił $7,88 \text{ kN/m}^3$.

Wyniki pomiarów przedstawione na rys. 4.45b wykazały, że przy poziomym rozsunięciu ścian od 5 do 7 μ nie występowały żadne zmiany naporu, a wykres z badań pokrywa się z wykresem naporu teoretycznego (krzywe 1 i 2). Dalsze zwiększenie się przesuwu ścian było przyczyną zmniejszenia się wartości naporu poziomego, przy czym stopień tego zmniejszenia był maksymalny w dolnej strefie komory (krzywa 4, rys. 45b). Rozsuniecie ścianek na odległość średniej wielkości ziaren pszenicy prowadzi do jeszcze większego spadku wartości naporu. Zahamowanie dalszego spadku wartości naporu czynnego wystąpiło po rozsunięciu ścian modelu na odległość ok. 7,5 mm. Zmianę wartości naporu poziomego w zależności od wartości przemieszczania ściany modelu badanego silosu przedstawiono na wykresie (rys.4.46).



Rys.4.46. Wykres zmiany wartości naporu poziomego w zależności od wartości radialnego przemieszczenia ściany komory [52]
 Fig.4.46. Changes in horizontal pressures as a function of chamber wall radial shift [52]

Model silosu z naturalną podatnością składał się ze sztywnych stalowych słupków i 24 krzywoliniowych elementów ścian połączonych ze słupkami za pomocą pasków z elastycznego tworzywa. Dzięki zmianie grubości pasków z tworzywa uzyskiwano różne podatności elementów ścian komory silosu. Wyniki pomiarów (rys.4.45a) wykazały, że rozkład i wartości naporu poziomego na podatnych ścianach są zupełnie inne aniżeli na sztywnych. Wartości naporu poziomego działającego na podatne ściany silosu są znacznie niższe od wartości obliczonych teoretycznie według wzoru Jansse-
 na (krzywe 3 i 4, rys. 4.45a). Warto również zwrócić uwagę na miejscowe zmniejszenie wartości naporu poziomego pszenicy na poziomie czujników nr 7 i 8, gdzie podatność ściany była niższa aniżeli np. na poziomie czujników nr 11 i 12. Na podstawie obserwacji przepływu pszenicy w modelu z naturalną podatnością stwierdzono, że podczas opróżniania materiał sypki przemieszczał się równomiernie w całym przekroju komory i dopiero w końcowej fazie, gdy poziom ziarna znajdował się na wysokości 1,2 m, na jego powierzchni tworzył się lej wypływu.

Autorzy badań wskazywali również na występowanie nierównomierności w rozkładzie naporu poziomego, jednakże stopień tej nierównomierności był znacznie mniejszy aniżeli w silosach ze ścianami sztywnymi. Wystąpiły również różnice w częstotliwości zmian wartości naporu. Częstotliwość zmian naporu poziomego na ścianach sztywnych wynosiła od 0,08 do 0,1 Hz, zaś na ścianach podatnych (przy przemieszczeniach około 1,5 do 4,0 mm) od 0,35 do 0,5 Hz. Obciążenie dna w obydwu badanych modelach różniło się również od wartości obciążeń obliczonych ze wzorów teoretycznych. Wartości naporu na dno komory z podatnymi ścianami zmieniały się liniowo, a nie według asymptoty, jak przyjmuje się w teoretycznych założeniach do obliczeń. Podczas opróżniania następował nagły spadek wartości globalnego obciążenia dna.

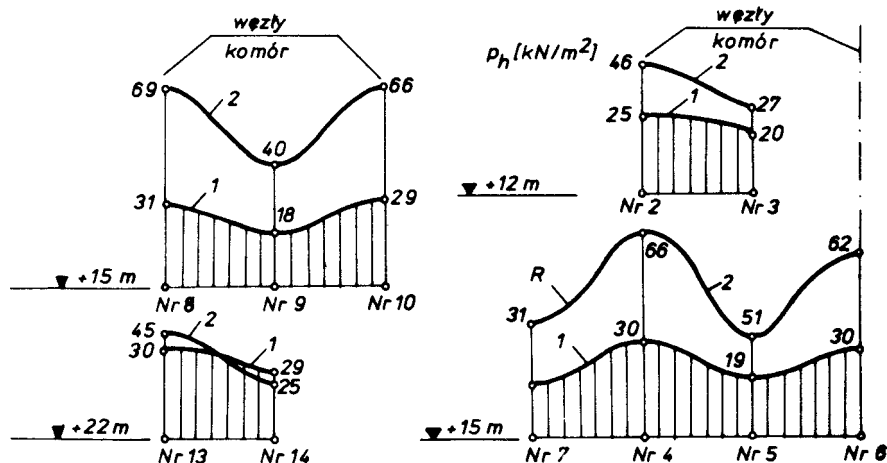
Berdičevski i in. [5] badali stan odkształceń ścian i rozkład naporu w prefabrykowanym silosie rzeczywistym. Komora silosu była wykonana z krzywoliniowych, wstępnie sprężonych elementów, pogrubionych na końcach w celu wzajemnego połączenia ich na śruby. Połączenia te (cztery na obwodzie) pokrywały się w pionie, stanowiąc w ten sposób pilastry o znacznej sztywności. Wykresy rozkładu pomierzonych wartości naporu poziomego wzdłuż obwodu badanej komory silosu przedstawiono na rys. 4.45c. Z wykresów tych wynika, że wartości naporu poziomego są najwyższe na pilastrach stanowiących sztywne elementy ścian prefabrykowanych komór. Sztywność ścian zwiększa się również po wypełnienia sąsiednich komór. Wzrost wartości naporu poziomego wynosił 8-10%.

Podczas opróżniania komory zwiększyła się nierównomierność rozkładu naporu. Wartości naporu na pilastrach były od 20 do 60% większe od wartości naporu pomierzonego na odcinkach cienkich ścian między pilastrami (krzywe 2, rys. 4.45c). Gdy sąsiednie komory były wypełnione materiałem sypkim, wartości naporu poziomego w badanej komorze były wyższe prawie 15-20%. Wartości naporu zboża na ścianę gwiazdkowej komory, ze względu na jej większą sztywność, były równe w przybliżeniu wartościom naporu pomierzonym na pilastrach komory zewnętrznej.

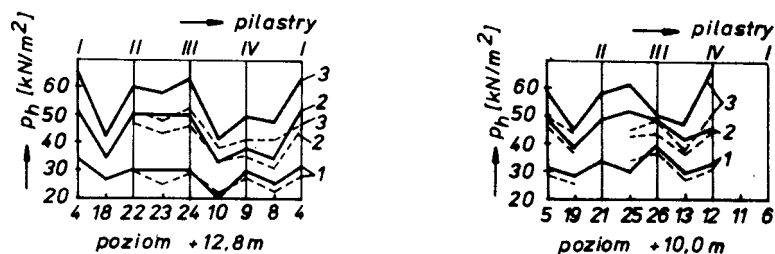
Wpływ wypełnienia sąsiednich komór na wzrost mierzonych wartości naporu poziomego potwierdzony został również przez Lightfooda i Samana [89] w badaniach modelu silosu z komorami kwadratowymi.

Eksperymentalne badania rozkładu naporu poziomego zboża wzdłuż obwodu monolitycznej żelbetowej baterii silosu przedstawił Platonov i in. w pracy [133]. Wyniki tych badań wskazują także na istnienie wpływu podatności ścian silosu na rozkład i wartości pomierzonego naporu (rys. 4.47). Wartości naporu poziomego pomierzone na sztywnych węzłach komór były znacznie większe od wartości naporu działającego na podatną ścianę między węzłami. Różnice te po napełnieniu komory wynosiły 40-50%, zaś podczas opróżniania sięgały 60-80% (w niektórych przypadkach nawet do

a) PLATONOV i inni [133]



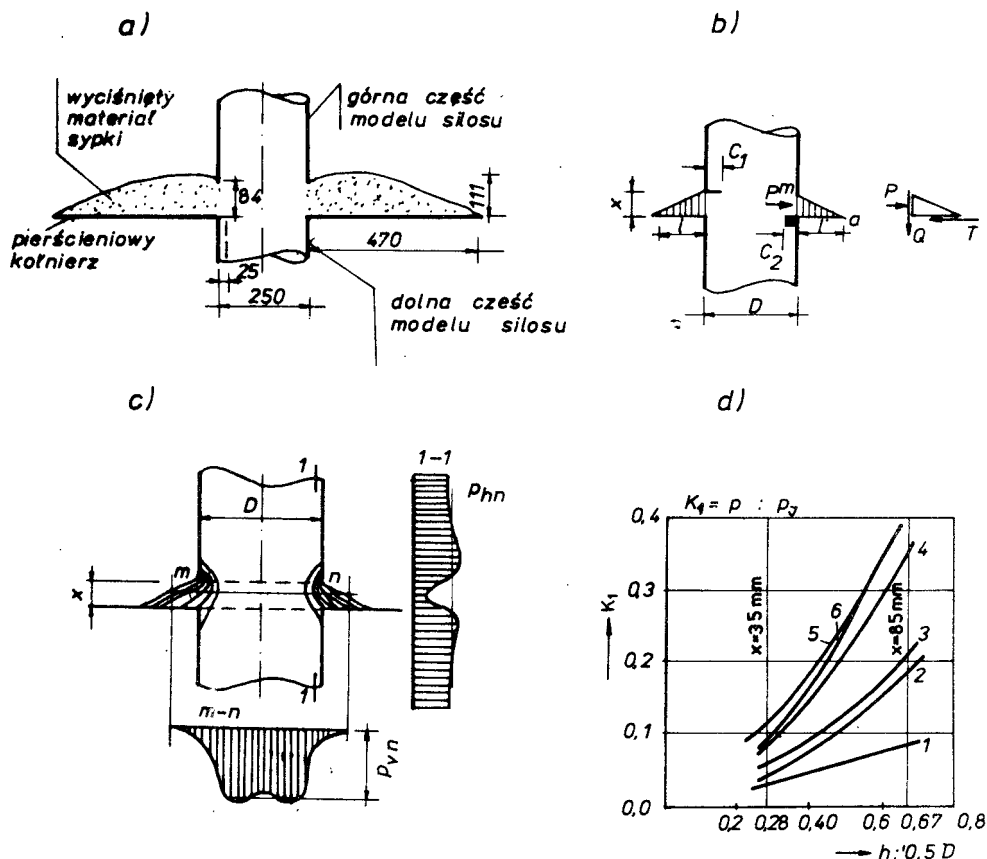
b) BERDIČEVSKI i inni [5]



Rys.4.47. Przykłady rozkładów naporu poziomego materiału sypkiego wzdłuż obwodu przekroju poziomego komory silosu o różnej miejscowo sztywności ściany

Fig. 4.47. Examples of a horizontal pressure distribution of a bulk solid along the circumference of a silo chamber cross-section and for different local rigidities of the walls

100%). Największa nierównomierność rozkładu naporu poziomego występowała w środkowej strefie komory (poziom + 15,0 m), natomiast najmniejsza w górnej i dolnej strefie, w których podatność ścian wyrównuje się dzięki połączeniu komory ze stropami. W celu podkreślenia znaczenia wpływu zmian sztywności ściany wzdłuż obwodu komory na rozkład naporu poziomego przedstawiono na rys. 4.47 również wyniki opisanych badań.



Rys.4.48. Wyniki badań wpływu lokalnej podatności ściany silosu na zmianę wartości naporu poziomego materiału sypkiego [86]: a - schemat wyciśniętego zboża przez szczelinę pierścieniową, b - schemat sił działających na wyciśnięty pierścień zboża, c - wykres naporu rozkładu poziomego i pionowego w obszarze pierścieniowej szczeliny, d - wykresy zmiany ilorazu naporu $p : p_v$ w zależności od wysokości szczeliny pierścieniowej (1 - napełnienie do górnej krawędzi szczeliny, 2 i 3 - napełnienie całego modelu z wewnętrznym górnym żebrami 25 i 13 mm, 4 - pełne napełnienie bez wewnętrznych żeber, 5 i 6 - pełne napełnienie z wewnętrznymi żebrami dolnymi 25 i 13 mm)

Fig.4.48. Results of studies into the effect of a silo wall local deformability on the change in bulk solid horizontal pressure [86]: a - corn pressed out through the ring cut, b - forces acting on the pressed out corn, c - horizontal and vertical pressures within the range of the ring cut, d - changes of $p : p_v$ ratio as a function of the height of the ring cut 1 - filling to the upper edge of the ring cut, 2 and 3 - filling the whole of the model with the upper ribs 25 and 13 mm, 4 - loading to the full without inner ribs, 5, 6 - loading to the full with inner lower ribs 25 and 13 mm

Wpływem lokalnej podatności ścian silosu na wartości naporu poziomego zajmował się Kuročkin [86]. Zastosowany w jego badaniach model cylindrycznego silosu podzielony został na dwie części. Niższa część komory silosu wysokości 375 mm miała płaskie dno z otworem wysypowym. Wysokość górnej części wynosiła 3×375 mm. Obydwie części modelu silosu mogły być tak ustawione, że między ich krawędziami tworzyła się pierścieniowa szczelina wysokości 35 lub 84 mm (rys. 4.48a). W trakcie napełniania i opróżniania pszenica mogła wysypywać się na kołnierz pierścieniowy, który zamocowany był do górnej krawędzi części komory wyposażonej w dno. Na kołnierzu wyrysowano 12 okręgów, które umożliwiały pomiar objętości wyciśniętego materiału sypkiego. Celem badań było określenie różnic objętości wyciśniętej przez szczelinę pierścieniową pszenicy podczas napełniania i opróżniania badanego modelu silosu. Wewnątrz komory silosu, na górnej lub dolnej krawędzi szczeliny pierścieniowej, mogły być zakładane różnej wielkości płaskie pierścienie (szer. C_1 i C_2 , rys. 4.48b), które modelowały różne przeszkody w przepływie materiału sypkiego. Jak wykazały badania, wewnętrzne dolne pierścienie szerokości C_2 wpływały bardzo nieznacznie na ilość wyciskanej pszenicy. Gdy wewnętrzne pierścienie umieszczono powyżej pierścieniowej szczeliny, wpływ ten był dużo większy.

Na rysunku 4.48b przedstawiono schemat sił działających na wyciśnięty pierścień pszenicy w trakcie napełniania modelu silosu. Do teoretycznej oceny naporu w strefie szczeliny przyjęto założenie, że napór poziomy na całą powierzchnię tej szczeliny jest mniejszy od sił tarcia występujących podczas przemieszczania się wyciskanej masy materiału sypkiego. Przy dodatkowym założeniu, że model silosu nie zawiera pierścieni wewnętrznych lub co najwyżej występują one na dolnej krawędzi szczeliny, ciężar wyciśniętego materiału:

$$Q = \gamma_0 \frac{x_1}{2} 2\pi \left(\frac{D}{2} + \frac{1}{3} \right), \quad (4.13)$$

gdzie oznaczenia według rys. 4.45.

Oprócz tego uwzględnić należy siły tarcia na powierzchni m-n (rys. 4.48b) równe Pf_1 (gdzie P - wypadkowa naporu poziomego działająca na całej powierzchni pierścieniowej szczeliny, f_1 - współczynnik tarcia wewnętrznej).

Do ścięcia wyciśniętej masy materiału sypkiego potrzebna jest następująca siła:

$$P \geq \gamma_0 \frac{x_1}{2} 2\pi \left(\frac{D}{2} + \frac{1}{3} \right) f + P f_1 f, \quad (4.14)$$

lub

$$P \geq \frac{f}{1 - f_1^2} \gamma_0 \frac{x_1}{2} \pi D \left(1 + \frac{2}{3} \frac{1}{D} \right).$$

Jako parametr naporu poziomego Kuročkin przyjął bezwymiarowy iloraz $K_1 = P : P_J$ gdzie: P_J - wypadkowa naporu poziomego obliczona z całej powierzchni pierścieniowej szczeliny ze wzoru Janssena:

$$P_J = \frac{\gamma_0 D}{4f} \pi D x, \quad (4.15)$$

gdzie f - współczynnik tarcia materiału sypkiego o ścianę silosu.

Na podstawie zależności (4.14) i (4.15) parametr naporu poziomego musi spełniać następującą nierówność

$$K_1 \leq \frac{P}{P_J} = \frac{2 f f_1}{1 - f_1^2} \frac{1}{D} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{1}{D} \right). \quad (4.16)$$

Za minimalną wartość naporu poziomego w pierścieniowej szczelinie można przyjąć ciśnienie, przy którym materiał sypki podczas wysypywania sięga górnego poziomu szczeliny. W tym przypadku napór P został określony jako składowa ciśnienia działającego na podpierającą ściankę pionową (utworzoną z materiału sypkiego) długości πD i wysokości x . Uwzględniwszy wartość kąta tarcia zboża o ścianę równą 25° , wartość tego naporu:

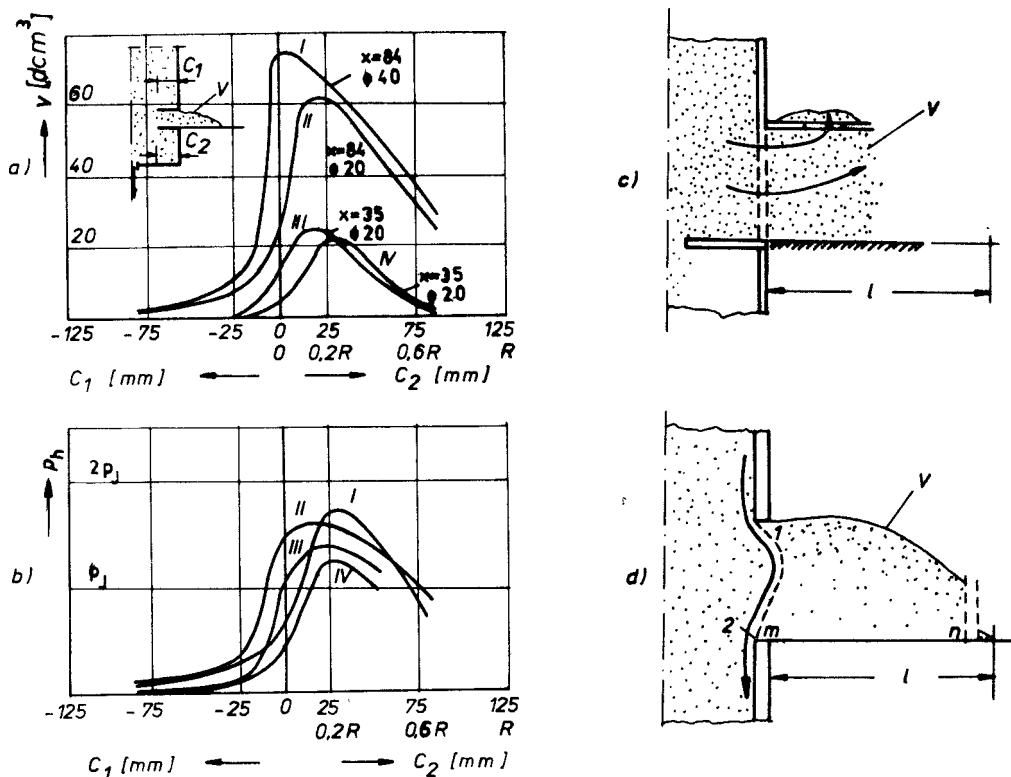
$$P = 0,322 \frac{\gamma_0 x^2}{2} \pi D, \quad (4.17)$$

natomiast

$$K_1 = \frac{P}{P_J} = 0,2 \frac{x}{D}. \quad (4.18)$$

Na rysunku 4.48c przedstawiono wykres naporu poziomego i pionowego zboża w obszarze szczeliny pierścieniowej, zaś na rys. 4.48d wykresy parametru K_1 obliczonego ze wzoru (4.16). Z wykresów tych wynika, że po zmianie wysokości szczeliny pierścieniowej od 35 do 84 mm ($0,14 D$ do $0,34 D$) wartości naporu poziomego w strefie tej szczeliny wynoszą od 10 do 40% wartości naporu teoretycznego.

Kuročkin wykazał również, że podczas opróżniania badanego modelu silosu ilość zboża wyciśniętego przez szczelinę pierścieniową jest znacznie większa aniżeli w trakcie napełniania. Na rysunku 4.49a przedstawiono zależność ilości wyciśniętej pszenicy podczas opróżniania od szerokości wewnętrznych żeber umieszczonych na górnym lub dolnym poziomie szczeliny pierścieniowej. Z wykresów tych wynika, że maksymalna ilość zboża została wyciśnięta wtedy, gdy wysokość szczeliny pierścieniowej była równa 84 mm, otwór wysypowy miał średnicę 40 mm, a na ścianach wewnątrz komory nie było żadnych żeber. Minimalna ilość zboża została wyciśnięta wtedy, gdy szczelina miała wysokość najmniejszą (35 mm), śred-



Rys.4.49. Wyniki badań Kuročkina [86]: a,b - ilość wyciśniętego zboża oraz wartości naporu podczas opróżniania w zależności od wysięgu wewnętrznych żeber, c - schemat badań ilości wyciskanego zboża w kierunku pionowym przez otwór o niewielkiej średnicy, d - schemat linii poślizgu materiału sypkiego w obszarze szczeliny pierścieniowej

Fig.4.49. Results of studies by Kuročkin [86]: a,b - the amount of the pressed out corn and the pressure during discharging as a function of inner ribs reach, c - studies of the amount of corn pressed upwards through the opening of a small diameter, d - paths of shear of a bulk solid in the area of the ring cut

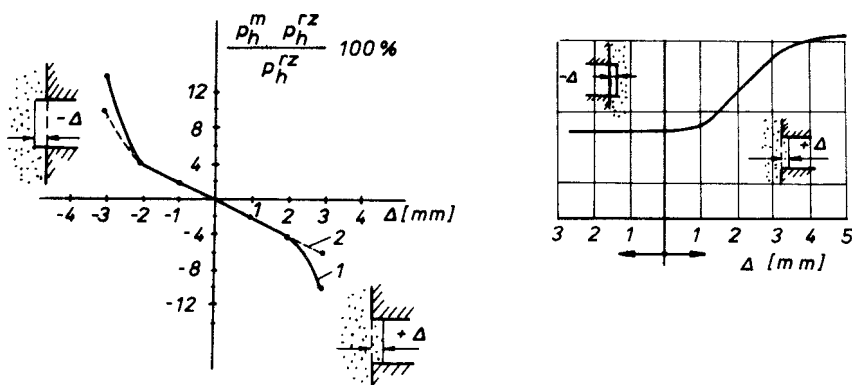
nica otworu wysypowego wynosiła 20 mm, komora wyposażona była w wewnętrzne zebro umieszczone bezpośrednio nad szczeliną pierścieniową. Na podstawie wyciśniętej ilości zboża Kuročkin określa maksymalny wzrost wartości naporu poziomego podczas opróżniania do 67% w stosunku do naporu pomierzonego po napełnieniu. Wyniki te wskazywały, że wpływ lokalnej podatności ścian silosu na wartość wzrostu naporu poziomego podczas opróżniania jest niewielki.

Na rysunku 4.49b przedstawiono wartości naporu poziomego działającego w szczelinie podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania.

Interesujące było również dodatkowe doświadczenie Kuročkina, w ramach którego nad wyciskaną masą zboża został umieszczony drugi pierścień z nawierconym otworem o średnicy 10 mm (rys. 4.49c). Podczas opróżniania przez otwór ten była wyciskana również pszenica w górę w kierunku pionowym. Warto tutaj dodać, że przy otworze wysypowym o identycznej średnicy usytuowanym w dnie komory silosu następowało zablokowanie wypływu zboża.

a) KAMIŃSKI / ZUBRZYCKI [61]

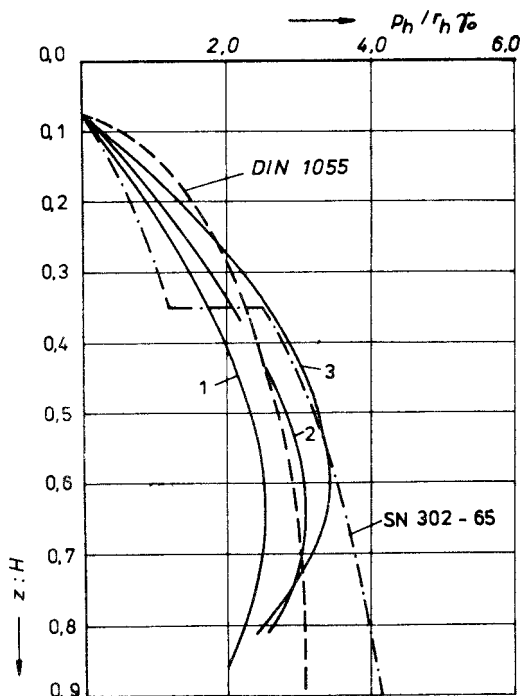
b) Badania Instytutu Technologicznego
w Odessie [86]



Rys.4.50. Wykresy wpływu nalicowania czujników ze ścianą komory na zmianę mierzonych wartości naporu poziomego
Fig.4.50. The effect of strain gauges being not "in line" with the chamber walls on the change in horizontal pressures measured

Wzrost wartości naporu poziomego w pierścieniowej szczelinie można wyjaśnić schematem przepływu zboża w jej obszarze (rys.4.49d). Płaszczyzna m-n sprzyja powstawaniu krzywoliniowej linii poślizgu 1-2 z wklęsłością w kierunku materiału sypkiego, znajdującym się w silosie, co wywołuje w tym obszarze wzrost naporu poziomego. Takie rozumowanie potwierdzają wyniki badań wpływu nielicowania czujników z wewnętrzną ścianą komory na zmianę naporu poziomego. Badania takie zostały wykonane m.in. przez Odeski Technologiczny Instytut [86] oraz przez Kamińskiego i Zubrzyckiego [61]. Dzięki tym badaniom wykazano, że niewielkie nielicowanie czujnika ze ścianą silosu wywołuje zmianę mierzonych wartości naporu w stosunku do rzeczywistych wartości działających na ścianę (rys. 4.50).

Wyniki badań prowadzonych przez Kuročkina wykazują dodatkowo, że do pomiaru naporu poziomego materiału sypkiego znajdującego się w spo-



Rys.4.51. Porównanie wykresów naporu poziomego w silosach o różnej podatności ścian [66]: 1 - silos w skali naturalnej, 2 - żelbetowy model prefabrykowany, 3 - żelbetowy model monolityczny
 Fig.4.51. Curves of horizontal pressures in silos of different wall flexibility: 1 - full-size silo, 2 - reinforced concrete prefabricated scale model, 3 - reinforced monolithic model

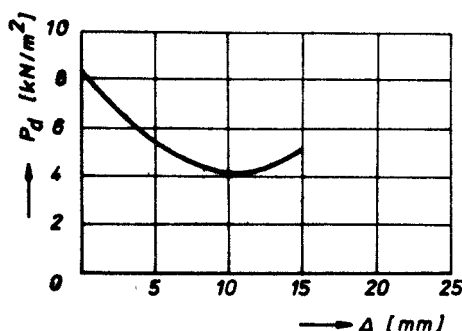
czynku wymagane są czujniki o sztywności równej w przybliżeniu sztywności ściany. Podczas opróżniania natomiast mogą być stosowane czujniki o większej podatności membrany nawet około 0,5 do 1,0 mm. Badania te umożliwiają również przybliżoną ocenę wartości naporu poziomego w strefie otworów w odciażających rurach perforowanych lub innych otworów wykonywanych w pionowych ścianach komór (np. do wysypu bocznego). Dzięki wynikom tych badań można wyjaśnić zasadę opróżniania silosu przez rury perforowane.

Ponieważ poruszający się w rurze materiał sypki będzie wywierał większe ciśnienie niż materiał sypki otaczający tę rurę, więc do wnętrza rury mogą zsypywać się jedynie powierzchniowe warstwy tego materiału.

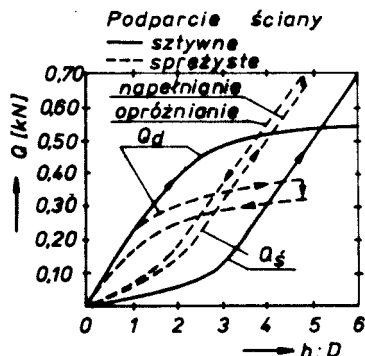
Istnienie wpływu podatności konstrukcji komór na wartości naporu poziomego wynika również z badań Kamińskiego i Zubrzyckiego [61,64,66], którzy prowadzili pomiary naporu poziomego zboża w żelbetowych silosach o różnej sztywności ścian. Wykresy naporu poziomego w badanych komorach

silosów przedstawiono na rys. 4.51. Wynika z nich, że największe względne wartości naporu poziomego wystąpiły w modelu monolitycznego silosu, który charakteryzował się największą sztywnością ścian. W prefabrykowanym modelu silosu o identycznych wymiarach jak model monolityczny podatność ścian była większa i z tego powodu pomierzone w nim wartości naporu poziomego były mniejsze. Najmniejsze względne wartości naporu wystąpiły w obiekcie w skali naturalnej, gdzie bezwzględne wartości promieniowych odkształceń ścian były największe.

a) JAHNS [57]



b) LENCZNER [88]



Rys.4.52. Wykresy pionowych obciążeń ścian i dna w zależności od ich podatności: a - wpływ podatności dna silosu, b - wpływ sprężystego lub sztywnego podparcia ściany silosu

Fig.4.52. Vertical pressures acting on the walls and the floor as a function of their flexibility: a - flexibility of the floor of a silo, b - the effect of elastic or rigid support of the wall

Dotychczas przeprowadzono zbyt mało badań wpływu podatnego podparcia dna i ścian silosów (umożliwiającego pionowe przemieszczenia konstrukcji) na wartość naporu materiału sypkiego. Trudno zatem dokonać głębszej oceny wzajemnych związków naporów działających na te elementy konstrukcji komór.

Wpływ podatności dna na wartość działającego na nie naporu piasku w trakcie napełniania badań Jahns [54].

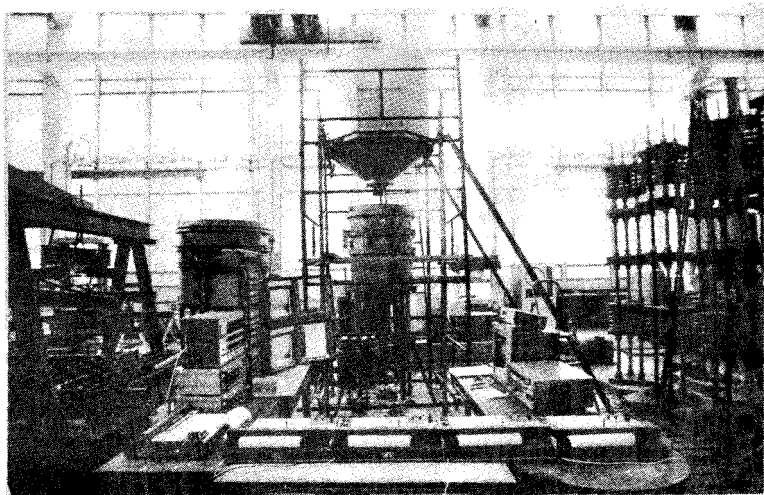
Na podstawie przedstawionych na rys. 4.52a wyników jego badań można stwierdzić, że podatność pionowa dna silosu prowadzi do zmniejszenia jego obciążenia. Po przemieszczeniu się dna o 10 mm w materiale sypkim powstawał plastyczny stan naprężeń, w którym zwiększenie wartości przemieszczeń nie miało wpływu na zmianę wartości naporu. Jahns nie wykonał jednak jednoczesnego pomiaru naporu działającego na ścianę silosu. Również nie mierzył on wartości naporu działającego podczas opróżniania silosu.

Badania wpływu sprężystego podparcia ściany silosu na wartość globalnych obciążeń ściany i dna komory silosu wykonał Lenczner [88]. Wyniki jego pomiarów (rys. 4.52b) wykazały, że w wyniku sztywnego podparcia ścian silosu wartości pionowych obciążeń globalnych działających na dno są większe aniżeli podczas podparcia sprężystego.

Odwrotnie wygląda rozkład wartości sił tarcia. Większe wartości sił tarcia wystąpiły podczas podparcia sprężystego ścian. Niestety również w badaniach Lencznera brakuje danych co do wartości naporu poziomego działającego na ściany komory badanego silosu.

4.5.2. Wyniki badań własnych

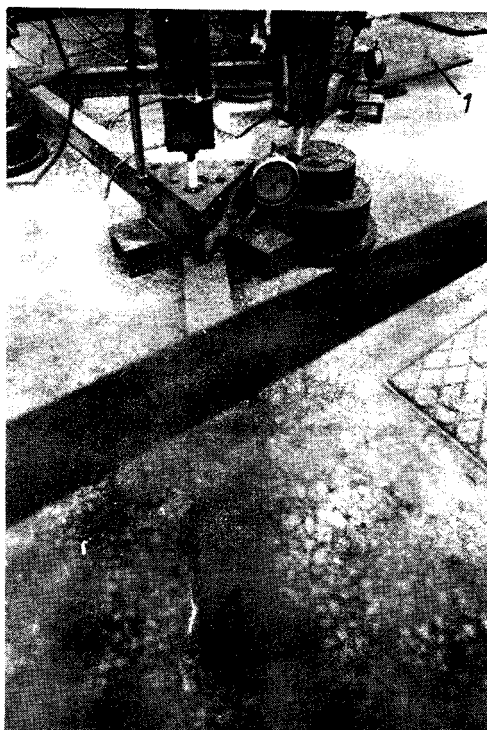
Badania wykonano z wykorzystaniem stalowego modelu silosu o średnicy wewnętrznej $D = 740$ mm i wysokości komory $H = 1015$ mm. Konstrukcję modelu, czujniki do pomiaru naporu oraz aparaturę badawczą szczegółowo opisano w p. 4.2.3.



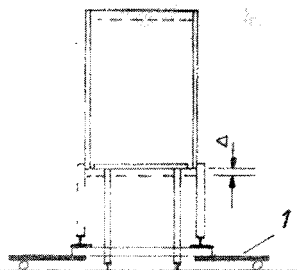
Rys.4.53. Widok stanowiska badawczego do pomiarów obciążeń modelu silosu z podatnym dnem lub ścianą

Fig.4.53. Test stand for measuring of the pressures acting on the model of a silo with a flexible floor or wall

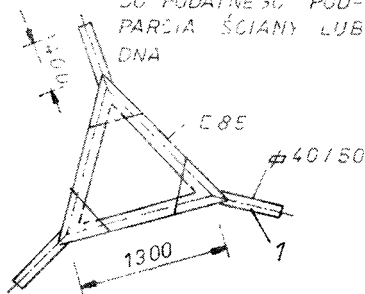
Pomiary zrealizowano dla dwóch przypadków podatności konstrukcji modelu silosu. W pierwszym cyklu badań, przy sztywnym dnie, możliwe były pionowe przemieszczenia ściany komory silosu. W drugim przypadku pomiarów podparto sprężystościę dno, natomiast ściana modelu opierała się na sztywnej konstrukcji słupów. Widok stanowiska badawczego oraz szczegół podparcia ściany lub dna silosu pokazano na rys. 4.53 i 4.54.



SCHEMAT PODPARCIA
ŚCIANY I DNA SIŁOSU



SCHEMAT ELEMENTU
DO PODATNEGO POD-
PARCIA ŚCIANY LUB
DNA



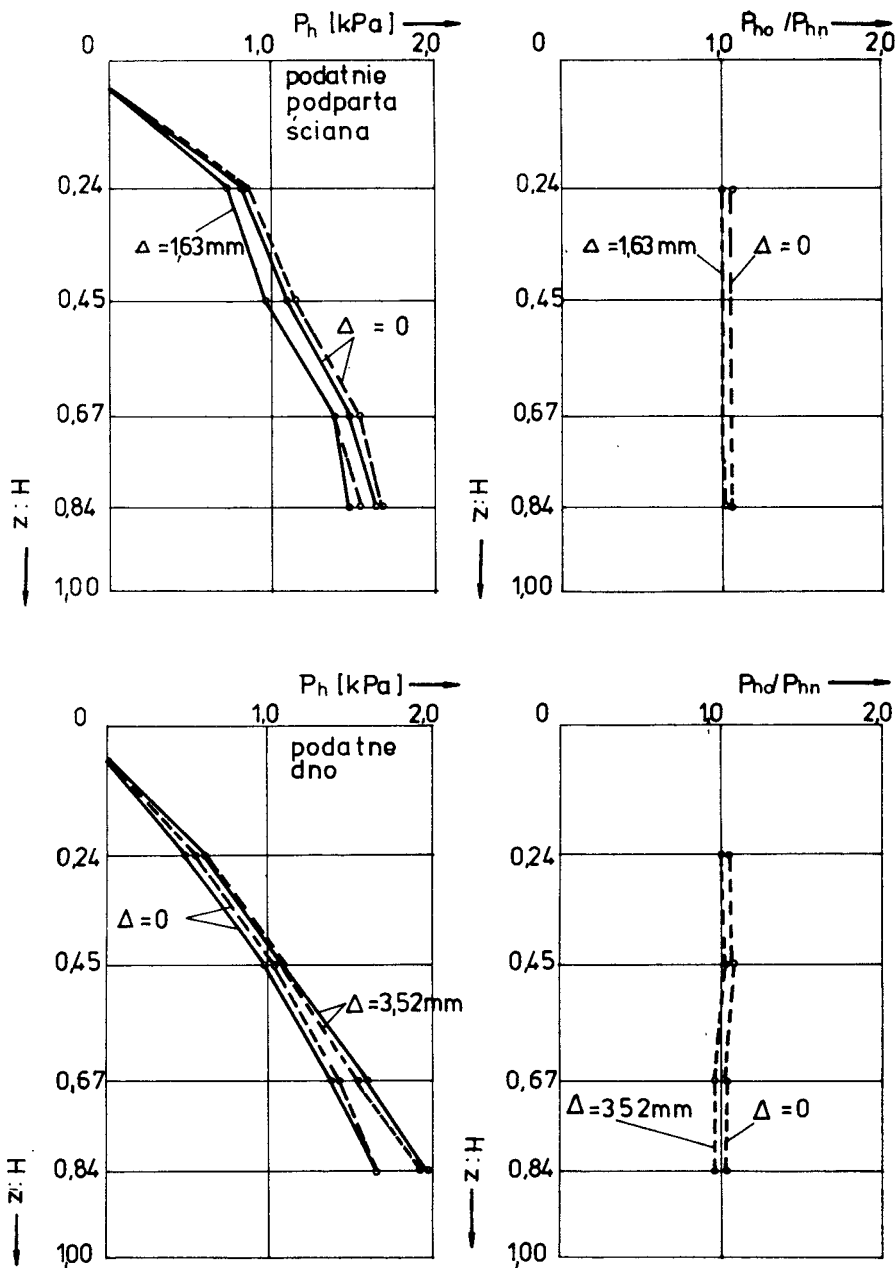
Rys.4.54. Szczegół podparcia ściany i dna badanego modelu silosu
Fig.4.54. Detail of the support of the floor and the wall of the silo studied

Pomiaru przemieszczeń dna lub ściany silosu dokonano za pomocą czujników zegarowych oraz jednego czujnika indukcyjnego podłączonego do rejestratora ciągłego zapisu.

Zmianę stopnia podatności elementów konstrukcji silosu można było uzyskać przez zmianę położenia cylindrycznego pręta podpierającego wsporniki konstrukcji stalowego trójkąta ułożonego pod nogami ściany lub dna (rys.4.54 - wsporniki 1).

Jako materiał obciążający komorę silosu stosowano pszenicę lub cukier, dla których wyznaczone wartości cech fizycznych zestawiono w p. 4.2.3 (tab.4.5).

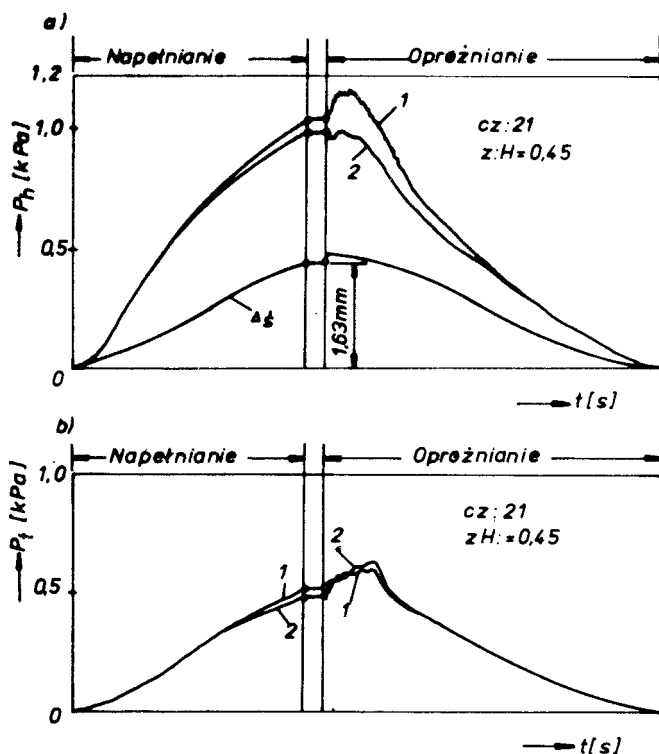
Na rysunku 4.55 przedstawiono wykresy naporu poziomego cukru, działającego na ściany modelu silosu podczas jego napełniania i opróżniania. Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, że wpływ podatności ściany oraz dna silosu na zmianę wartości naporu poziomego jest bardzo mały. Gdy ściana jest podatna w kierunku pionowym, w górnej strefie silosu



Rys.4.55. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu z podatnym dnem lub ścianą w kierunku pionowym (linie ciągłe - napełnianie, linie przerywane - opróżnianie)

Fig.4.55. Sugar horizontal pressures in the model of a silo with a vertically flexible floor or wall (solid lines - loading, broken lines - discharging)

wartości naporu nieznacznie zmniejszyły się, zaś w dolnej strefie (rys. 4.55a, $z : H = 0,67$) wartości naporu wzrosły. Gdy dno jest podatne (rys. 4.55b), notuje się niewielkie zmiany wartości naporu poziomego jedynie w dolnej strefie silosu.

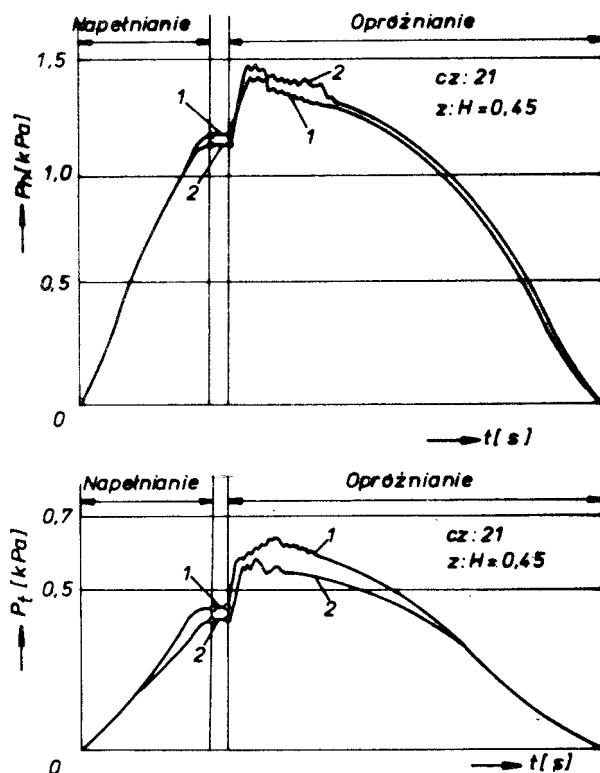


Rys.4.56. Przebieg zmian wartości naporu poziomego i stycznego cukru w modelu silosu ze ścianą podatną w kierunku pionowym: 1 - sztywne podparcie ściany, 2 - podatne podparcie ściany, Δ_g - zmiana przemieszczenia ściany silosu

Fig.4.56. Changes in sugar horizontal and tangential pressures in the model of a silo with a vertically flexible wall (1 - rigid wall support, 2 - flexible wall support, Δ_g - displacement of a silo wall)

Podatność ściany modelu w kierunku pionowym doprowadziła do uzyskania redukcji wzrostu wartości naporu poziomego cukru występującego w trakcie opróżniania silosu.

Przykład zmiany naporu poziomego cukru w trakcie napełniania i opróżniania silosu z podatną ścianą przedstawiono na rys. 4.56. Z przedstawionych na tym rysunku wykresów wynika, że podczas napełniania podatność ściany wywołała na poziomie $z : H = 0,45$ nieznaczny spadek wartości naporu poziomego i stycznego. W trakcie opróżniania w silosie z po-



Rys.4.57. Przebieg zmian naporu pszenicy dla różnych podatności podparcia ścian silosów: a - napór poziomy, b - napór styczny, (1 - sztywne podparcie ściany, 2 - podatne podparcie ściany)
 Fig.4.57. Wheat pressures at different flexibilities of silo wall support: a - horizontal pressure, b - tangential pressure (1 - rigid wall support, 2 - flexible wall support)

datną ścianą nie zarejestrowano na poziomie $z : H = 0,45$ żadnego wzrostu wartości naporu poziomego cukru (rys.4.56a). Wartość stycznego naporu była wyższa aniżeli w przypadku sztywnego podparcia ściany (rys. 4.56b).

W badaniach pszenicy (rys. 4.57) nie zanotowano, tak jak przy cukrze w trakcie opróżniania, redukcji wartości naporu poziomego. Wartości naporu poziomego bez względu na sposób podparcia ściany praktycznie były do siebie zbliżone. Brak wpływu podatności podparcia ściany na zmianę wartości naporu poziomego pszenicy podczas opróżniania można tłumaczyć występowaniem odmiennego rodzaju jej przepływu w porównaniu np. do cukru.

Istotny wpływ podatnego podparcia ściany lub dna silosu stwierdzono w badaniach wartości globalnych obciążeń tych elementów.

Wartości globalnych obciążeń ściany i dna silosu dla
różnych podatności ich podparcia

Materiał sypki	Podatne podparcie e- lementu	Maksy- malna wartość piono- wego prze- miesz- czenia $\Delta_{\max}$ (mm)	Wartości globalnego obciążenia [N]							
			napełnianie				opróżnianie			
			ściana		dno		ściana		dno	
			$Q_{si}N$	%	$Q_{d1}N$	Q	$Q_{s2}N$	%	$Q_{d2}N$	%
cu- kier	ściana	0	1399	41,5	1980	58,5	1443	43,1	1912	56,9
		0,65	1121	33,0	2243	67,0	1139	33,8	2232	66,2
		1,63	903	26,5	2500	73,5	910	26,7	2500	73,3
	dno	0	1399	41,5	1980	58,5	1443	43,1	19,12	56,9
		1,78	1397	42,9	1863	57,1	1397	43,0	1853	57,0
		3,52	1580	50,0	1581	50,0	1581	50,0	1580	50,0
psze- nica	ściana	0	1476	45,3	1781	54,7	1574	49,8	1585	50,2
		0,20	1263	38,8	1990	61,2	1378	42,7	1847	57,3
		1,20	919	28,6	2295	71,4	1040	32,6	2153	67,4
	dno	0	1402	43,0	1859	57,0	1520	46,9	1720	53,1
		0,35	1427	44,5	1782	55,5	1580	49,5	1615	50,5
		2,92	1788	55,6	1429	44,4	1850	57,9	1345	32,1

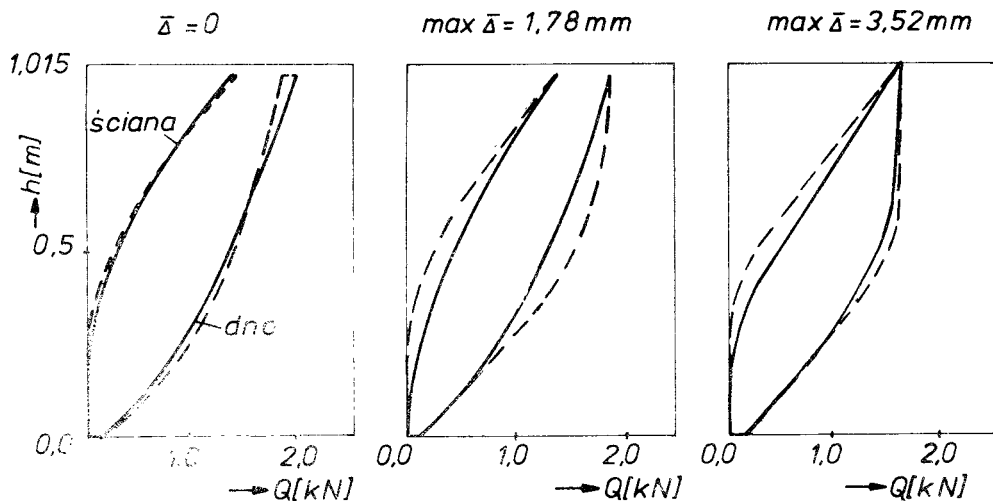
Wzrost podatności podparcia dna silosu wywołuje spadek wartości jego obciążenia. Spadkowi obciążenia dna towarzyszy wzrost wartości globalnego obciążenia ścian pochodzącego od sił tarcia. Odwrotne przegrupowanie wartości obciążeń obserwuje się w wyniku zwiększania podatności podparcia ściany. W takim przypadku siły tarcia zmniejszają się, rośnie zaś obciążenie dna silosu.

Wyniki tych pomiarów zestawiono w tab. 4.20 oraz przedstawiono w postaci wykresów na rys. 4.58 i 4.59.

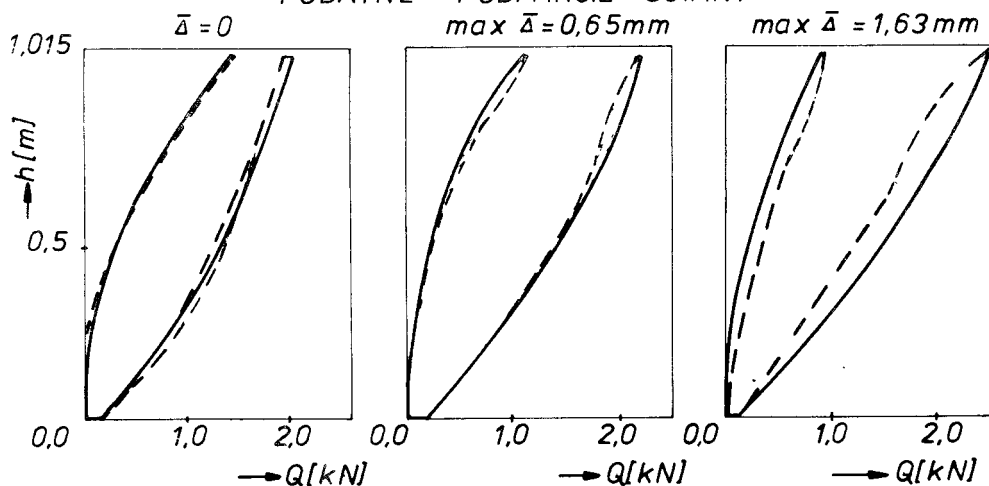
Na rysunku 4.60 przedstawiono wykresy wpływu pionowej podatności dna i ściany silosu na ich globalne obciążenia. Na osi pionowej wykresu naniesiono wartości obciążenia wyrażone w procentach w stosunku do całkowitego ciężaru materiału sypkiego znajdującego się w badanym modelu silosu.

Przebieg wykresów podkreśla różnice w zachowywaniu się dwóch różnych materiałów sypkich składowanych w identycznej komorze silosu. W przypadku pszenicy niewielkie przemieszczenia dna lub ściany silosu wywołu-

PODATNE DNO



PODATNE PODPARCIE ŚCIANY

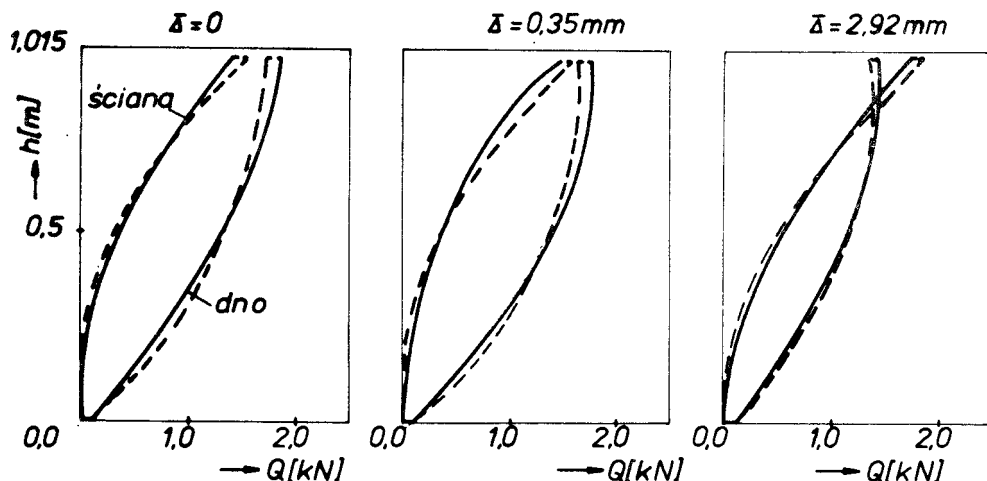


Rys.4.58. Wpływ pionowej podatności dna i ściany silosu na wartości ich obciążeń globalnych (materiał sypki: cukier, linie ciągłe - napełnianie, linie przerywane - opróżnianie)

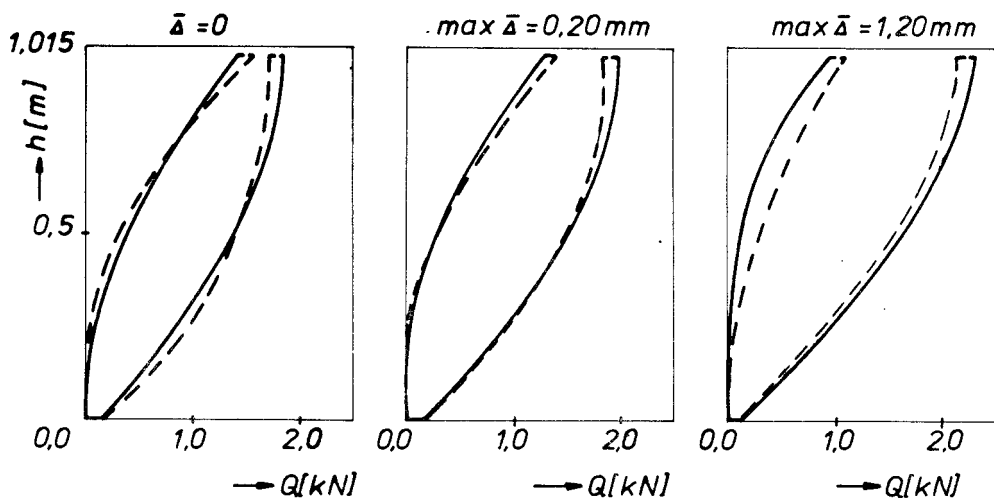
Fig.4.58. The effect of the vertical flexibility of the floor and the wall of a silo on their total pressures (bulk solid: sugar, solid lines - filling, broken lines - discharging)

ją plastyczny stan naprężeń. Wartości globalnych obciążeń stabilizują się już podczas przemieszczeń od 1,5 do 2,0 mm. Aby osiągnąć taki stan dla cukru konieczne są przemieszczenia ściany lub dna przekraczające 3,0 mm.

PODATNE DNO



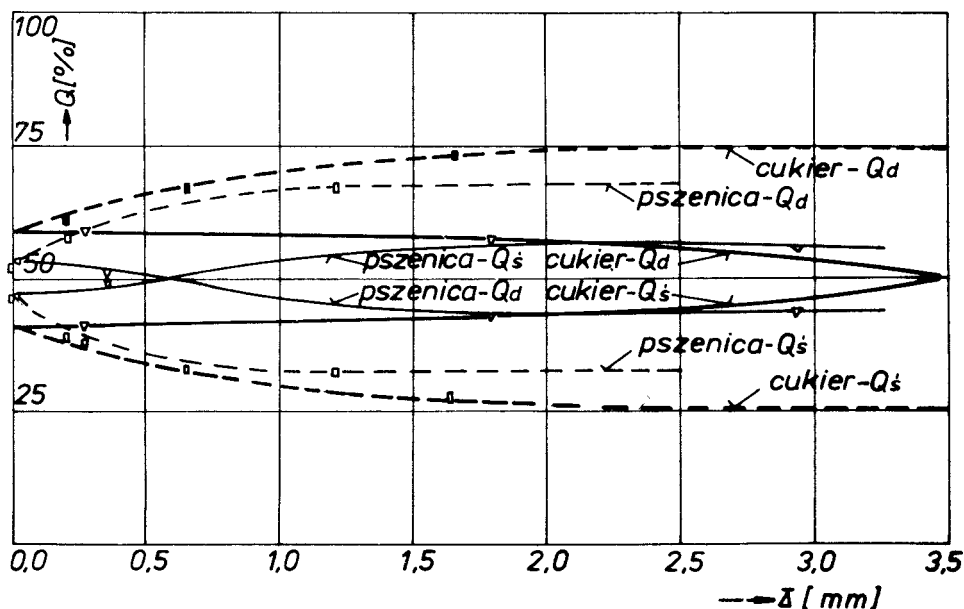
PODATNE PODPARCIE ŚCIANY



Rys.4.59. Wpływ pionowej podatności dna i ściany silosu na ich obciążenie globalne (materiał sypki: pszenica, linie ciągłe - napełnianie, linie przerywane - opróżnianie)

Fig.4.59. The effect of the vertical flexibility of the floor and the wall of a silo on their total pressures (bulk solid: wheat, solid lines - filling, broken lines - discharging)

W jednym z cykli pomiarów komora modelu silosu napełniona została, gdy podparcie dna i ściany było sztywne. Następnie usunięto blokadę sprężystego podparcia ściany, dzięki czemu przemieściła się ona w kierunku pionowym o 4,8 mm. Przykład zarejestrowanych zmian naporu pszenicy, wywołanych tym przemieszczeniem, pokazano na rys.4.61.



Rys.4.60. Wpływ pionowej podatności konstrukcji komory silosu na zmianę procentowego rozdziału obciążeń ściany i dna (linie ciągłe podatnie podparte dno, linie przerywane - podatnie podparta ściana, Q_d - obciążenie globalne dna, Q_s - obciążenie globalne ściany)

Fig.4.60. The effect of the vertical flexibility of the floor and the wall on their total pressures (solid lines - flexible floor support, broken lines - flexible wall support, Q_d - total pressure on the floor, Q_s - total pressure on the wall)

Zmiana podparcia ściany ze sztywnego na podatne wywołała nagłe zmiany wartości naporu pszenicy. Wartości naporu poziomego wzrosły, zaś wartości naporu stycznego zmniejszyły się.

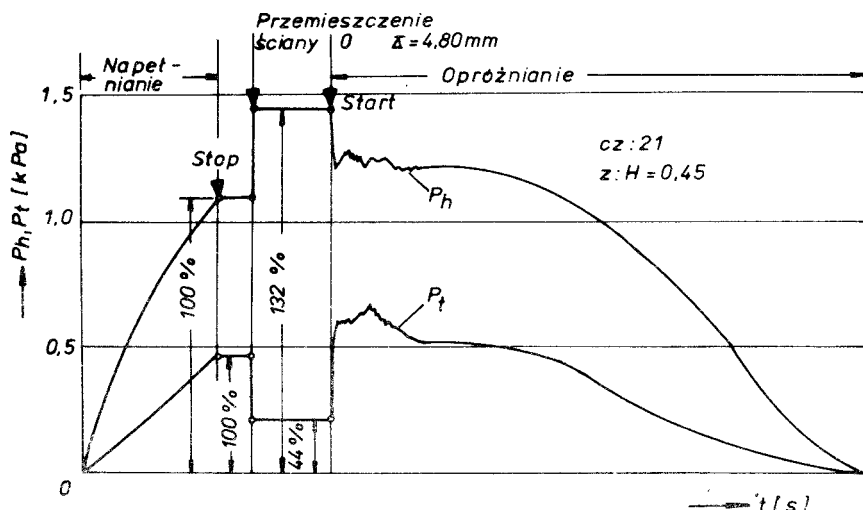
Wartości zmian obydwu naporów były różne na badanych poziomach ściany silosu i w stosunku do naporu napełniania wynosiły:

a) wzrost naporu poziomego:

- o 22% ; $z : H = 0,24$,
- o 32% ; $z : H = 0,45$,
- o 59% ; $z : H = 0,67$,
- o 67% ; $z : H = 0,84$;

b) spadek naporu stycznego:

- o 16% ; $z : H = 0,24$,
- o 56% ; $z : H = 0,45$,
- o 122% ; $z : H = 0,67$,
- o 150% ; $z : H = 0,84$.

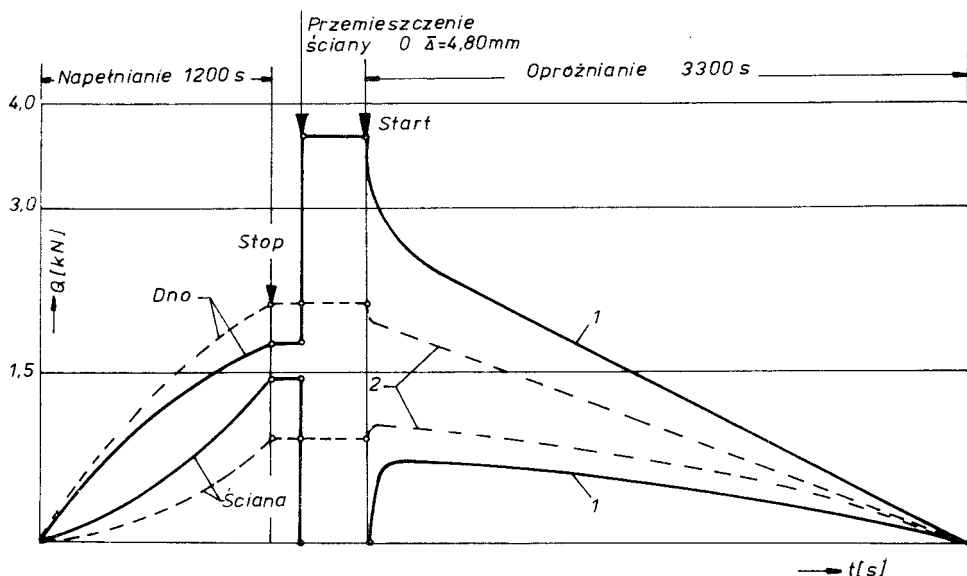


Rys.4.61. Przebieg zmian naporu poziomego i stycznego pszenicy przy zmianie podparcia ściany ze sztywnego na podatne po napełnieniu komory silosu

Fig.4.61. Changes of the horizontal and tangential wheat pressures when switching from a rigid wall support to a flexible one during filling

Wzrost naporu poziomego, wywołany pionowym przemieszczeniem się ściany po napełnieniu silosu, wynosił w dowolnej strefie komory aż 67% i był znacznie większy od wartości tego naporu rejestrowanego w trakcie opróżniania komory. Interesujące są również zmiany znaku naporu stycznego w dolnej strefie silosu (spadek o 122 lub 150%). Występujące wzdłuż wysokości komory różnice znaków sił tarcia można wyjaśnić tym, że w górnej części komory, po wprowadzeniu podatnego podparcia ściany, możliwości przemieszczania się pszenicy są większe od wartości przemieszczeń ściany. Dlatego właśnie w tej strefie wystąpił stosunkowo niewielki spadek wartości sił tarcia (bez zmiany znaku). W dolnej strefie silosu możliwości przemieszczania się ziaren pszenicy ze względu na sztywne dno są bardzo małe, zaś przesunięcie ściany było identyczne jak w górnej strefie silosu. Warunki te doprowadziły do zmiany znaku sił tarcia na przeciwny, co oznacza, że część ciężaru ściany przekazywana była na materiał sypki i dalej na dno. Zjawisko to jest wyraźnie widoczne na wykresach zmiany globalnych obciążeń ściany i dna silosu. Wykresy te zaprezentowano na rys. 4.62.

Z wykresów przedstawionych na rys. 4.62 wynika, że wprowadzenie podatności podparcia ściany od początku napełniania silosu (krzywe 2) doprowadziło do dużego zwiększenia wartości globalnego obciążenia dna i



Rys.4.62. Przebieg zmian obciążenia globalnego ścian i dna modelu silosu wywołanych podatnym podparciem ściany: 1 - wymuszone przemieszczenie ściany po napełnieniu komory, 2 - podatne podparcie ściany od momentu rozpoczęcia napełniania

Fig.4.62. Changes in the total pressure on the walls and the floor of the model of a silo brought about by a flexible wall support: 1 - as a result of forced wall displacement after filling the chamber, 2 - at flexible wall support starting from the onset of filling

zmniejszenia wartości obciążenia ściany. W momencie rozpoczęcia opróżniania wystąpił nieznaczny wzrost obciążenia ściany i niewielki spadek obciążenia dna.

Zastosowanie podatnego podparcia ściany dopiero po napełnieniu silosu (krzywa 1) wywołało istotną zmianę w wartościach globalnych obciążeń ściany i dna. Globalne obciążenie dna wzrosło o ponad 100%. Obciążenie ściany zmniejszyło się do zera, co wskazuje na całkowite zrównoważenie ciężaru ściany przez działające w przeciwnym kierunku siły tarcia.

W momencie rozpoczęcia opróżniania zarejestrowano duży spadek wartości obciążenia dna, a także pojawiły się siły tarcia materiału sypkiego o ścianę silosu. Obydwa globalne obciążenia nie osiągnęły jednak tych wartości, które występowały podczas podatnego podparcia ściany wprowadzonego od samego początku napełniania.

W praktyce przypadek wystąpienia przemieszczania pionowego elementów konstrukcji komory silosu może powstać np. podczas występowania róż-

nicy osiadań fundamentów leja i ściany. Innym przykładem może być awaria konstrukcji leja (np. nadmierne ugięcie, pęknięcie ścianek, itp.) lub ściany (np. utrata stateczności w silosach stalowych).

Opisane wyniki badań własnych podkreślają istniejące różnice oddziaływań dwóch różnych materiałów sypkich w identycznym silosie.

Badania wykazały również, że podatne podparcie dna lub ściany silosu nie ma większego wpływu na zmianę wartości naporu poziomego działającego podczas napełniania silosu. W trakcie opróżniania modelu wypełnionego cukrem uzyskano redukcję wzrostu naporu poziomego dzięki podatnemu podparciu ściany. Redukcja taka nie wystąpiła w silosie wypełnionym pszenicą.

Podatne podparcie ściany lub dna jest przyczyną znacznego przegrupowania się wartości globalnych obciążeń elementów składowych konstrukcji komory. Zwiększenie podatności dna zmniejsza wartość działającego na nie obciążenia, natomiast zwiększa wartości sił tarcia o ścianę. Wzrost podatności ściany prowadzi do spadku wartości sił tarcia i jednocześnie wywołuje wzrost obciążenia dna.

Pionowe przemieszczenie ściany, występujące po zakończeniu napełniania komory, ma duży wpływ zarówno na wartości naporu poziomego i stycznego, jak również na wartości globalnych obciążeń dna i ściany silosu.

4.5.3. Uogólnienie wyników badań własnych

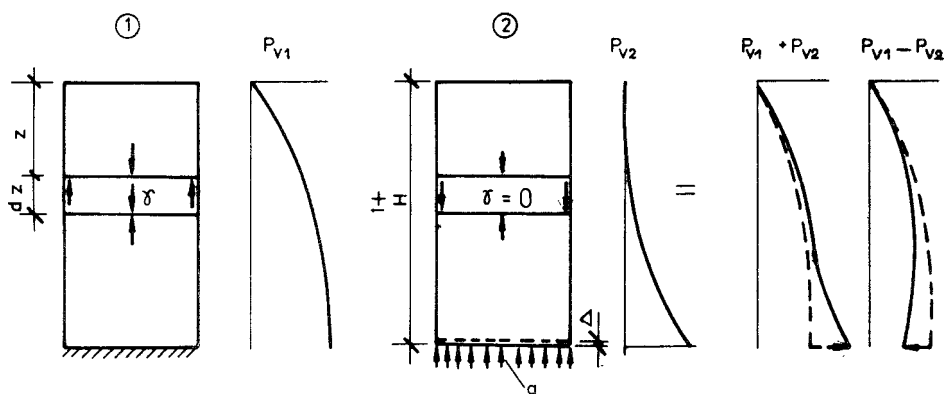
Badania eksperymentalne wykazały, że pionowa podatność ściany lub dna silosu wywołuje znaczne zmiany naporu materiału sypkiego szczególnie w dolnej strefie komory. Wyniki tych badań można uogólnić teoretycznie przez przyjęcie dodatkowego obciążenia q , równoważącego wpływ przemieszczeń dna lub ściany na zmiany naporu materiału sypkiego. Schematy rozkładu naporu pionowego z uwzględnieniem zastępczego obciążenia q przedstawiono na rys. 4.63.

Pierwszy schemat ilustruje obciążenie komory silosu, które można wyznaczyć ze znanych rozwiązań teoretycznych, np. Janssens lub Dreschera.

Na drugim schemacie przedstawiono komorę silosu wypełnioną nieważkim materiałem sypkim obciążonym zastępczym obciążeniem q , usytuowanym na dnie komory. Zgodnie z rys. 4.63 napór pionowy materiału sypkiego wynosi:

$$P_v = P_{v1} \pm P_{v2} \quad (4.19)$$

Z warunków równowagi elementarnej warstwy materiału sypkiego według schematu 1 otrzymamy znane wyrażenie określające p_{v1} :



Rys.4.63. Schematy rozkładu naporu pionowego w silosie z podatnym podparciem dna lub ściany

Fig.4.63. Horizontal pressure distributions in a silo with a flexible wall or floor support

$$p_{v1} = \frac{\gamma r_h}{k \tan \phi_s} \left(1 - e^{-\frac{k \tan \phi_s}{r_h} z} \right). \quad (4.20)$$

Aby wyznaczyć napór p_{v2} , pominąć należy ciężar materiału sypkiego (schemat 2). Z warunków równowagi otrzymać można następujące równanie:

$$p_v F - (p_{v2} + dp_{v2}) F - p_t U dz = 0, \quad (4.21)$$

po podstawieniu

$$p_{h2} = k p_{v2},$$

$$p_t = p_{h2} \tan \phi_s = k p_{v2} \tan \phi_s$$

oraz

$$\frac{F}{U} = r_h$$

otrzymamy następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{dp_{v2}}{dz} + \frac{k \tan \phi_s}{r_h} p_{v2} = 0. \quad (4.22)$$

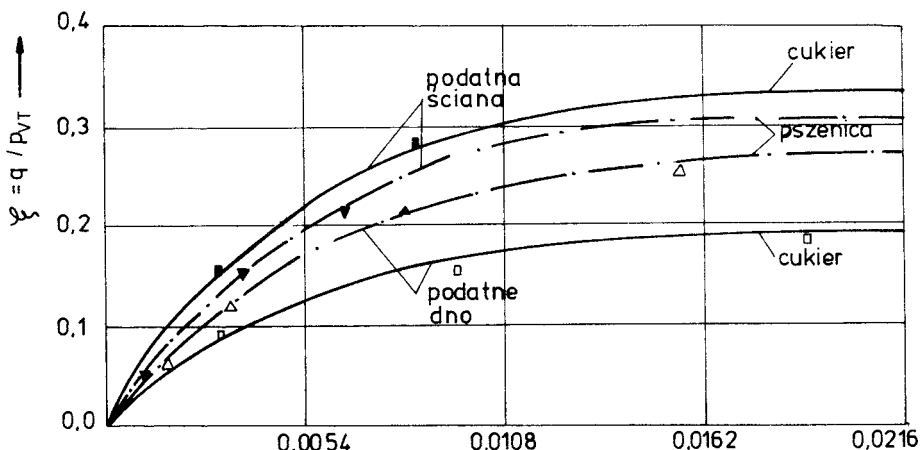
Rozwiązując równanie to dla warunków brzegowych $H - Z = 0 \rightarrow p_{v2} = q$, otrzymamy

$$p_{v2} = q e^{-\frac{k \tan \phi_s}{r_h} (H-z)}. \quad (4.23)$$

Ostatecznie napór pionowy w silosie z podatnym podparciem ściany lub dna wynosi:

$$p_v = \frac{\gamma r_h}{k \operatorname{tg} \phi_s} \left(1 - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s}{r_h} z} \right) \pm q e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s}{r_h} (H-z)}, \quad (4.24)$$

przy czym znak "-" odnosi się do podatnego podparcia dna, natomiast znak "+" obejmuje wpływ podatnego podparcia ściany.



Rys.4.64. Wykres zmiany parametru ξ
Fig.4.64. Changes of parameter ξ

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych zastępcze obciążenie q określić można wzorem:

$$q = \xi p_{vT}, \quad (4.25)$$

w którym

ξ - parametr zależny od wartości przemieszczeń ściany lub dna,
 p_{vT} - pionowy napór wyznaczony teoretycznie bez uwzględnienia stopnia podatności konstrukcji komory.

Z wykorzystaniem wyników pomiarów na rys. 4.64 przedstawiono wykres parametru ξ dla cukru i pszenicy w zależności od pionowych przemieszczeń dna lub ściany silosu Δ , odniesionych do hydraulicznego promienia komory silosu r_h .

Zmianę parametru ξ można zapisać w postaci następującego wyrażenia:

$$\xi = c \left(1 - e^{-\frac{18 \gamma}{r_h} z} \right), \quad (4.26)$$

gdzie c - stała odpowiedczalna, której wartości wynoszą:

a) dla cukru:

$c = 0,35$ przy pionowej podatności ściany,

$c = 0,20$ przy pionowej podatności dna,

b) dla pszenicy:

$c = 0,32$ przy pionowej podatności ściany,

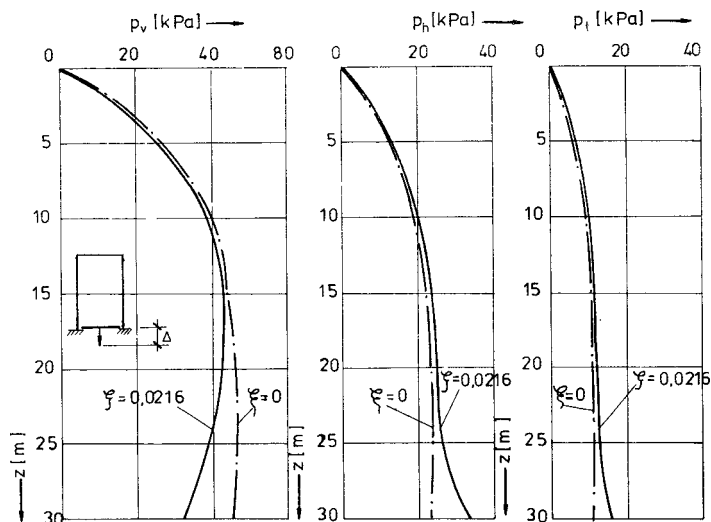
$c = 0,28$ przy pionowej podatności dna.

Przez analogię do wzoru (4.24) napór poziomy i styczny można napisać następująco:

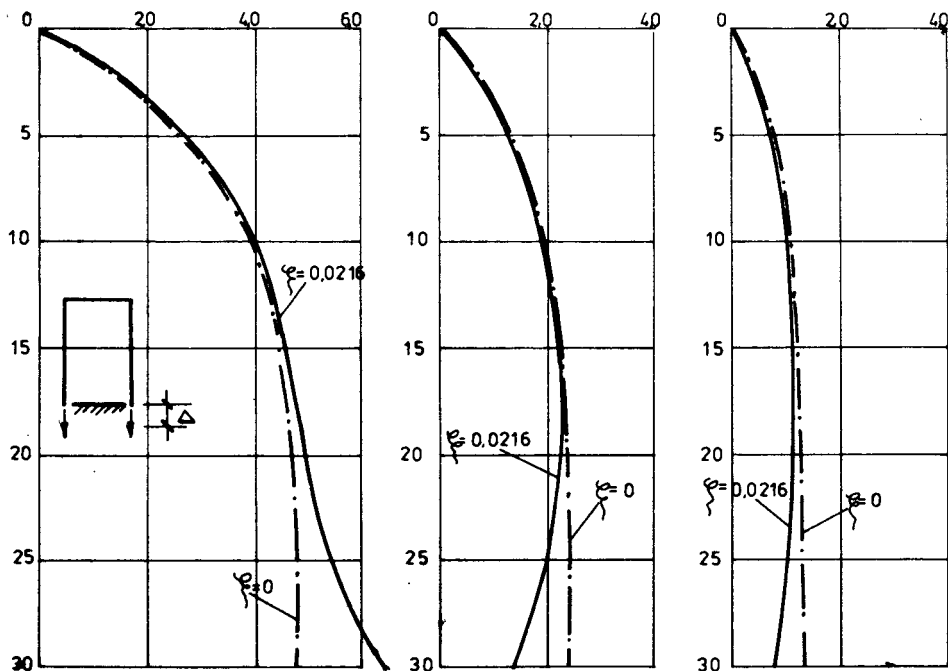
$$p_h = \frac{\gamma r_h}{\operatorname{tg} \phi_s} \left(1 - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s z}{r_h}} \right) \pm k q e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s}{r_h} (H-z)}, \quad (4.27)$$

$$p_t = \gamma r_h \left(r - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s z}{r_h}} \right) \pm k q \operatorname{tg} \phi_s e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s}{r_h} (H-z)}, \quad (4.28)$$

przy czym w tym przypadku znak "+" odnosi się do podatnego dna, natomiast znak "-" występuje podczas obliczania wpływu pionowej podatności ściany.



Rys.4.65. Wykresy naporu pszenicy w silosie z podatnym dnem ($\xi = 0$ - rozkład naporu bez uwzględnienia wpływu podatności)
Fig.4.65. Wheat pressure distribution in a silo with a possible floor flexibility ($\xi = 0$ pressure distribution not taking into account the effect of flexibility)



Rys.4.66. Wykresy naporu pszenicy w silosie z możliwą pionową podatnością ściany ($\xi = 0$ - rozkład naporu bez uwzględnienia wpływu podatności)

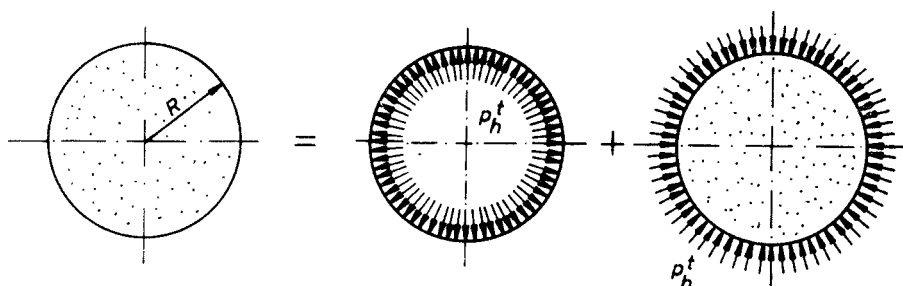
Fig.4.66. Wheat pressure in a silo with a possible vertical wall flexibility ($\xi = 0$ pressure distribution not taking into account the effect of flexibility)

W celu zobrazowania zmian naporu w obiekcie w skali naturalnej na rys.4.65 i 4.66 przedstawiono wykresy naporu pszenicy z uwzględnieniem pionowych przesunięć dna i ściany komory. Wartości naporu obliczono dla następujących danych: $\gamma = 8,2 \text{ kN/m}^3$, $\text{tg} \phi_s = 0,5$, $k = 0,5$, $D = 6,0 \text{ m}$, $H = 30 \text{ m}$, $\xi = 0,0216$ (tzn. $\Delta = 3,24 \text{ cm}$).

4.5.4. Rozwiązania teoretyczne uwzględniające poziome przemieszczenia ścian

4.5.4.1. Napór bierny wywołany wskutek obniżenia temperatury zewnętrznej

Theimer [158], w wyniku analizy awarii stalowego silosu powstałej wskutek szybkiego obniżenia się temperatury zewnętrznej, określili wartość dodatkowego biernego materiału sypkiego, wywołanego skróceniem obwodu płaszcza komory. Przy założeniu płaskiego stanu naprężeń oraz ważności prawa Hooke'a dodatkowy napór bierny p_h^t wywołany działaniem



Rys.4.67. Schemat biernego naporu powstającego wskutek obniżenia temperatury zewnętrznej

Fig.4.67. Passive pressure due to the drop in the temperature outside the silo [158]

temperatury obliczono z warunku równości odkształceń płaszcza komory i wycinka materiału sypkiego (rys.4.67).

Warunek równości odkształceń można napisać w następującej postaci:

$$\Delta_m = \Delta_s, \quad (4.29)$$

gdzie

Δ_m - wartość radialnego odkształcenia plastra materiału sypkiego wskutek nacisku ściany komory,

Δ_s - radialne odkształcenie ściany silosu w wyniku skrócenia obwodu komory pod wpływem obniżenia temperatury oraz w wyniku działania reakcji materiału sypkiego.

Wielkość odkształcenia plastra materiału sypkiego obliczyć można z następującego wyrażenia:

$$\Delta_m = 2 \int_0^R p_h^t \left(\frac{1 - \nu_m}{E_m} \right) dR = 2 R p_h^t \frac{1 - \nu_m}{E_m}, \quad (4.30)$$

natomiast odkształcenie radialne stalowej ściany wyniesie:

$$\Delta_s = 2 \left(R \alpha_t \Delta t - \frac{p_h^t R}{h_s E_s} \right). \quad (4.31)$$

Po podstawieniu wzorów (4.30) i (4.31) do wyrażenia (4.29) otrzymał Theimer wartość dodatkowego naporu biernego materiału sypkiego w następującej postaci:

$$p_h^t = \frac{\alpha_t E_m \Delta t}{\frac{R E_m}{h_s E_s} + (1 - \nu_m)}. \quad (4.32)$$

Orosz [114] przenosi podejście Theimera na przestrzenny stan naprężeń i wyznacza dodatkowy napór bierny powstający w żelbetowych komorach siłosów wskutek szybkiego lub powolnego obniżenia się temperatury zewnętrznej. Jako podstawę obliczeń przyjęto następujące równania odkształceń materiału sypkiego:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_m} (\sigma_r - \nu_m \sigma_\varphi - \nu_m \sigma_z), \quad (4.33)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E_m} (\sigma_\varphi - \nu_m \sigma_r - \nu_m \sigma_z), \quad (4.34)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_m} (\sigma_z - \nu_m \sigma_r - \nu_m \sigma_\varphi) \quad . \quad (4.35)$$

Wskutek symetrii

$$\sigma_r = \sigma_\varphi = \sigma_h. \quad (4.36)$$

Przy założeniu, że pionowe odkształcenia materiału sypkiego w kierunku pionowym są równe zeru, tzn. $\varepsilon_z = 0$, otrzymuje się z (4.33) następującą zależność:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_h}{E_m} [1 - \nu_m (1 + 2 \nu_m)]. \quad (4.37)$$

Wyrażenie (4.37) po wprowadzeniu współczynnika odkształceń

$$C_m = \frac{E_m}{1 - \nu_m (1 + 2 \nu_m)} \quad (4.38)$$

można zapisać w następującej postaci:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_h}{C_m} \quad (4.39)$$

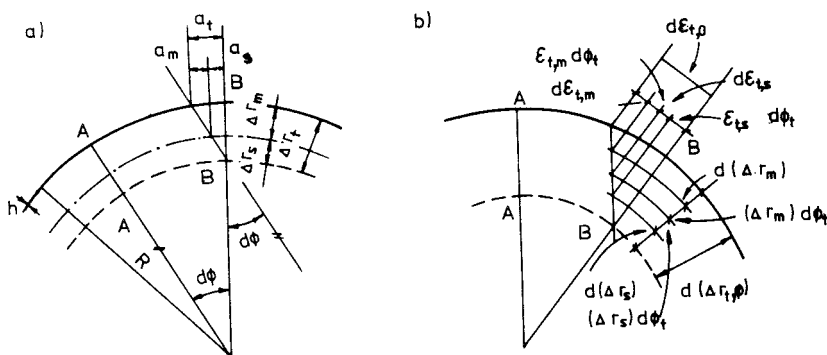
(w płaskim stanie naprężeń współczynnik C_m według Theimera wynosi $C_m = E_m / (1 - \nu_m)$).

Z warunku równowagi odkształceń (rys.4.68a)

$$\Delta r_t - \Delta r_m - \Delta r_s = 0 \quad (4.40)$$

otrzymuje się następujące wyrażenie określające wartość dodatkowego naporu biernego:

$$p_h^t = \frac{\alpha \Delta t h E_{sb}}{R + \frac{h E_{sb}}{C_m}}. \quad (4.41)$$



Rys.4.68. Schemat odkształceń żelbetowych ścian silosu wskutek obniżenia temperatury zewnętrznej [113]: a - podczas szybkiego obniżenia temperatury, b - podczas powolnego obniżenia zewnętrznej temperatury

Fig.4.68. Deformations in reinforced concrete silo walls due to the decrease of temperature outside the silo [113]: a-rapid drop of temperature, b - gradual decrease of temperature

Jeżeli obniżenie temperatury odbywa się w dłuższym czasie, Orosz uwzględnia - oprócz sprężystych odkształceń materiału sypkiego - także wpływ jego pełzania.

Na podstawie oznaczeń z rys. 4.68b Orosz formułuje następujące równanie odkształceń:

$$\frac{d \epsilon_{t,o}}{dt} - \frac{d \epsilon_{t,s}}{dt} - \epsilon_{t,m} \frac{d \varphi_t}{dt} - \frac{d \epsilon_{t,m}}{dt} = 0, \quad (4.42)$$

w którym

$$\frac{d \epsilon_{t,o}}{dt} = \frac{\alpha \Delta t}{n} \frac{d \varphi_t}{dt} - \text{poszukiwana zmiana odkształcenia podłużnego w czasie } t \text{ wskutek powolnego obniżenia temperatury,}$$

$$\frac{d \epsilon_{t,s}}{dt} = \frac{R_o}{h_s E_b} \frac{d p_{h,t}}{dt} - \text{sprężyste odkształcenie podłużne ściany komory w czasie } t,$$

$$\frac{\epsilon_{t,m} d \varphi_t}{dt} = \frac{p_{h,t}}{C_m} \frac{d \varphi_t}{dt} - \text{pełzanie materiału sypkiego w czasie } t,$$

$$\frac{d \epsilon_{t,m}}{dt} = \frac{d p_{h,t}}{dt} \frac{1}{C_m} - \text{sprężyste odkształcenie składowanego materiału w czasie } t.$$

Po wprowadzeniu pomocniczej wielkości

$$\beta_m = \frac{h_s E_b : C_m}{\frac{h_s E_b}{C_m} + R_o}, \quad (4.43)$$

gdzie

$$R_0 = \Delta r_1 / \varepsilon \varphi,$$

Δr_1 - odkształcenie ściany w kierunku radialnym,

otrzymuje się następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{dp_{h,t}}{d\varphi t} + \beta_m p_{h,t} - \beta_m \frac{\alpha \Delta t}{\varphi_n} C_m = 0. \quad (4.44)$$

W wyniku rozwiązania tego równania otrzymał Orosz następującą postać naporu $p_{h,t}$:

$$p_{h,t} = \frac{\alpha \Delta t C_{m,t}}{\varphi_n \frac{h E_m}{C_m}} (1 - e^{-\beta_m \varphi t}), \quad (4.45)$$

gdzie

$$C_{m,t} = \frac{E_{m,t}}{1 - \nu_m (1 + 2 \nu_m)},$$

$$E_{m,t} = \frac{E_m}{1 + \frac{2}{3} \varphi_t},$$

φ_t - współczynnik pełzania materiału sypkiego w czasie t :

$$\varphi_t = \varphi_n (1 - e^{-\beta t}),$$

φ_n - graniczna wartość współczynnika pełzania dla $t \rightarrow \infty$.

Ehlers [29] wprowadził do wyrażenia (4.41) zmienną funkcję modułu sprężystości materiału sypkiego, uzyskaną na podstawie badań eksperymentalnych. W pracy swej podaje on nomogramy do bezpośredniego wyznaczenia wartości dodatkowego naporu biernego $p_{h,t}$, powstającego wskutek szybkiego obniżania się temperatury zewnętrznej (rys.4.69).

Ponieważ nomogram przedstawiony na rys. 4.69 opracowany został dla stalowego silosu o grubości ściany 10 mm, więc podczas obliczania naporu $p_{h,t}$ w komorach silosów o innej grubości ściany należy korzystać ze wzoru:

$$p_{h,t} = p_{h,t'} \frac{\frac{n R + j}{h_s}}{\frac{n R}{h_s} + j}, \quad (4.46)$$

gdzie

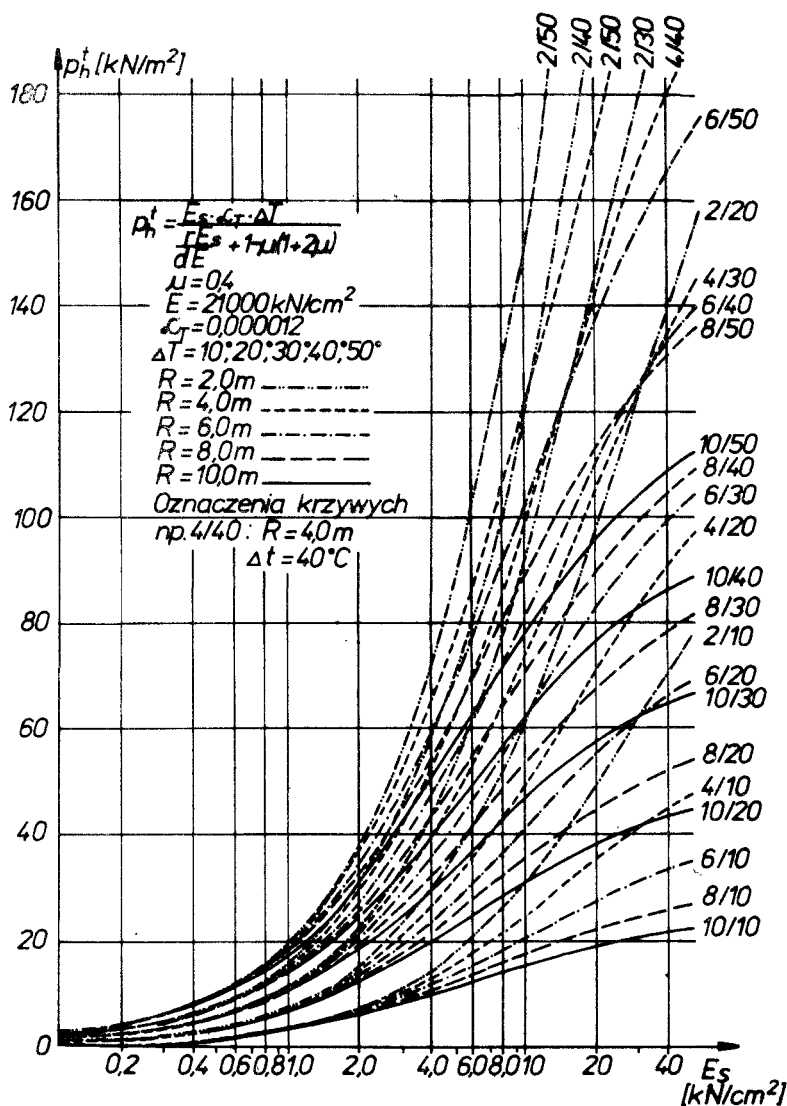
$$n = \frac{E_m}{E_a},$$

$$j = 1 - \nu_m (1 + 2 \nu_m),$$

h_s w cm.

Współczynnik sprężystości wg Ehlersa można zapisać w postaci:

$$E_m = a p_{vn}^2 + b, \quad (4.47)$$



Rys.4.69. Nomogram do wyznaczania wartości dodatkowego biernego naporu p_h^t [29]

Fig.4.69. Nomogram for determining the value of the additional passive pressure p_h^t [29]

gdzie

a i b - wartości współczynników określone na podstawie pomiarów: dla pszenicy: $a = 10\ 000$, $b = 0,3$; dla piasku: $a = 38\ 000$, $b = 0,4$.

W strefie komory silosu, w której występuje napór $p_{vn} < 0,01 \text{ kN/cm}^2$, ważna jest dla pszenicy zależność liniowa

$$E_m = 100 \sigma_v + 0,3. \quad (4.48)$$

Przyjęcie funkcji E_m w postaci wzorów (4.47) i (4.48) umożliwia bardziej realistyczną ocenę zachowywania się materiału sypkiego w biernym stanie naprężeń.

T a b e l a 4.21

Wartości dodatkowego naporu poziomego zboża p_h^t w stalowym silosie wskutek obniżenia się temperatury zewnętrznej

Dane do obliczeń	Napór po napełnieniu p_{hn} (kN/m^2)	Dodatkowy napór p_h^t (kN/m^2)			
		szybkie obniżenie temperatury o 20°C			powolne obniżenie temperatury o 20°C
		Theimer	Orosz	Ehlers	Orosz
geometria silosu: $D = 27,10 \text{ m}$ $h = 9,52 \text{ mm}$ materiał sypki: zboże $E = 7,0 \text{ kN/cm}^2$ $\varphi_n = 3$ $B_m = 0,3712$ $C_m = 25,0 \text{ kN/cm}^2$ $v_m = 0,4$	43,50	15,64 (34%)	22,27 (51%)	6,3 (16%)	13,44 (31%)

Uwaga. Wartości E_m przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych na Uniwersytecie Minnesota [wg 29]

W tabelach 4.21 zestawiono wyniki obliczeń według propozycji różnych autorów. Największe wartości dodatkowego naporu p_h^t w stalowym silosie otrzymano ze wzorów Orosza dla szybkiego obniżenia się zewnętrznej temperatury. W porównaniu do naporu wzrost po napełnieniu silosu wynosi 51%. Dla tego samego silosu według propozycji Ehlersa obniżenie temperatury o 20°C wywoła wzrost wartości naporu poziomego tylko o 16%.

W tabeli 4.22 zamieszczono wyniki obliczeń Orosza wykonane dla żelbetowego silosu o średnicy 7,5 m i grubości ściany 18 cm. Istotne w tym przypadku różnice wartości dodatkowego naporu poziomego wynikają ze stanu zarysowania ścian silosu.

T a b e l a 4.22

Wartości dodatkowego poziomego naporu zboża p_h^t w żelbetowym silosie obliczonego ze wzoru (4.45)

Dane do obliczeń	Napór po napełnieniu silosu P_{hn} (kN/m ²)	Dodatkowy napór p_h^t (kN/m ²)			
		nagłe obniżenie temperatury o 15 °C		powolne obniżenie temperatury o 15 °C	
		przekrój niezarysowany	przekrój zarysowany	przekrój niezarysowany	przekrój zarysowany
geometria silosu D = 7,5 m h = 18 cm bet.Eb 20000 MPa materiał sypki: zboże $E_m = 4000$ N/cm^2 $v_m = 0,4$	35,30	18,66 (53%)	7,56 (22%)	6,63 (19%)	4,72 (13%)

4.5.4.2. Napór czynny materiału sypkiego w silosach z podatnymi ścianami

Obliczenie wartości naporu czynnego polega na uwzględnieniu wzajemnej współpracy materiału sypkiego i ściany silosu. Rozwiązanie tego zadania przedstawili Truchlov i Galetov [35 i 159] przyjmując następujące założenia:

- materiał ścian oraz materiał sypki deformują się sprężysto,
- napór pionowy materiału sypkiego rozłożony jest równomiernie na całej płaszczyźnie przekroju poprzecznego komory silosu,
- rozkład naporu poziomego wzdłuż obwodu komory silosu jest równomierny i w ślad za tym rozpatrywane może być zadanie osiowoosymetryczne.

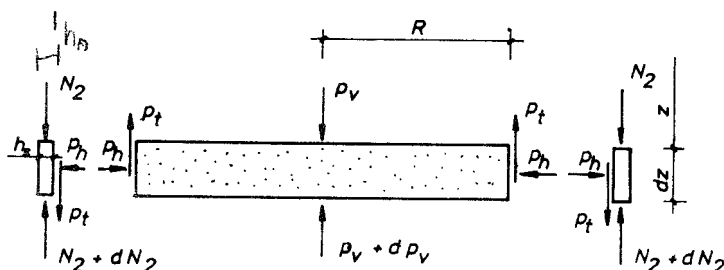
Po uwzględnieniu stanu równowagi sił i warunku równości odkształceń wydzielonego elementu konstrukcji ścian komory wraz z materiałem sypkim (rys.4.70) otrzymać można następujące zależności:

- równowaga elementarnego wycinka materiału sypkiego

$$\gamma_o R dz - R dp_v - 2 f p_h dz = 0 \quad (4.49)$$

- równowaga elementarnego wycinka pierścienia ścian

$$f p_h dz + \gamma_s h dz - d N_2 = 0 \quad (4.50)$$



Rys.4.70. Schemat równowagi sił elementarnego pierścienia konstrukcji ścian i plastra materiału sypkiego [158]

Fig.4.70. Equilibrium of forces in the elementary structural member of the wall and in the "slice" of a bulk solid

- równość odkształceń ścian i materiału sypkiego

$$R \left[\frac{N_1}{h_s E_{s1}} + \nu_s \frac{N_2}{h_s E_{s2}} \right] = R \left[\frac{\nu_m P_v}{E_m} - \frac{P_h (1 - \nu_m)}{E_m} \right]. \quad (4.51)$$

Przyjawszy dla wolno stojącego silosu wartość pierścieniowej siły $N_1 = R p_h$, w pracy [25] uzyskano następujące wzory określające wartości naporu poziomego i pionowego z uwzględnieniem wzajemnej współpracy ściany i materiału sypkiego:

$$P_v = \frac{\gamma_o R}{2 f \xi_1 \xi_2} \left(1 - e^{-\frac{2f}{R} \xi_1 \xi_2 z} \right) + \left(1 - \frac{1}{\xi_2} \right) \left(\gamma_o + \gamma_s \frac{2h_s}{R} \right) z \quad (4.52)$$

$$P_h = \frac{\gamma_o R}{2 f \xi_2} \left(1 - e^{-\frac{2f}{R} \xi_1 \xi_2 z} \right), \quad (4.53)$$

gdzie

$$\xi_1 = \frac{\nu_m}{1 - \nu_m + \frac{R E_m}{E_{s1} F_{s1} h_s}}; \quad \xi_2 = 1 + \frac{\nu_s R E_m}{2 \nu_m E_{s2} h_s}.$$

Ze wzorów (4.52) i (4.53) widać, że wartości naporu materiału sypkiego zależą od ilorazów $(R E_m)/(E_{s1} F_{s1})$ i $(R E_m)/(E_{s2} F_{s2})$. Gdy ściany komory w obydwu kierunkach (pierścieniowym i pionowym) są nieskończenie sztywne, wówczas ilorazy te są równe zero, a wzory (4.52) i (4.53) sprowadzają się do wzorów Janssena.

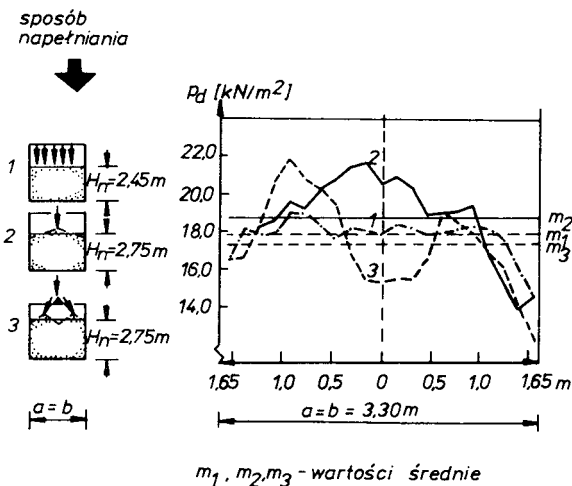
4.6. Sposób napełniania silosu

4.6.1. Wyniki dotychczas zrealizowanych badań

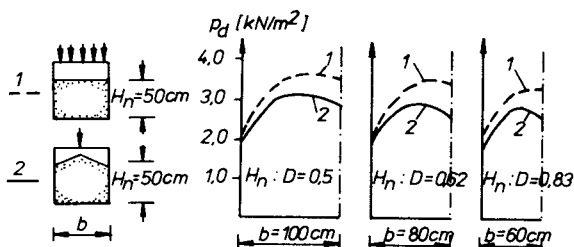
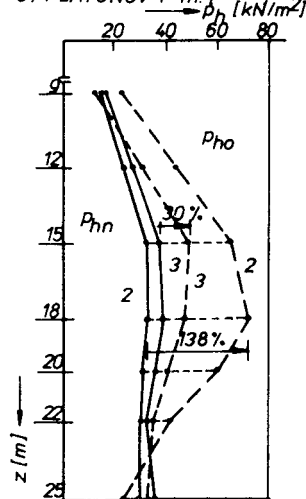
Sposób napełniania komory silosu istotnie wpływa na stan naprężeń w materiale sypkim. Teoretyczne i eksperymentalne badania wykazują, że

wartość wzrostu naporu poziomego materiału sypkiego w trakcie opróżniania silosu jest ściśle związana ze strukturą płynącego słupa ziarna, powstającą podczas napełniania komory i także w momencie rozpoczęcia ruchu.

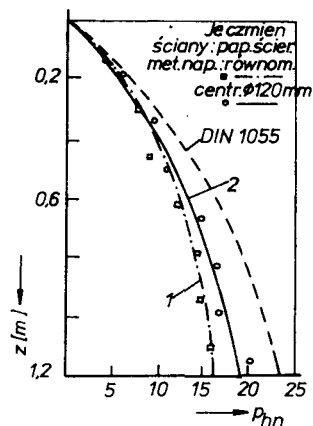
a) SAUL [146]



b) STROPPEL [151]

c) PLATONOV i in. ¹³²

d) PAUL [117]



Rys.4.71. Wyniki badań wpływu sposobu napełniania na rozkład i wartość naporu materiału sypkiego działającego na dno i ściany silosu
Fig.4.71. Results of studies of the effect of the way a silo is filled on the distribution and value of a bulk solid pressure on the floor and the walls of a silo

Badania takie mają duże znaczenie w praktyce, ponieważ ich wyniki mogą się przyczynić do uzyskania znacznych efektów ekonomicznych związanych z budową nowych silosów. Można mianowicie ustalić taki sposób zasypywania silosu, który spowoduje znaczne zmniejszenie wartości naporu materiału sypkiego po napełnieniu silosu, a także ograniczenie jego wzrostu powstającego w trakcie opróżnienia komory.

Saul [146] wykonał pomiary naporu kukurydzy na dno kwadratowego zbiornika o wymiarach komory w przekroju poziomym 3,30 m x 3,30 m i wysokości 2,75 m. Komora zbiornika mogła być napełniana trzema następującymi sposobami:

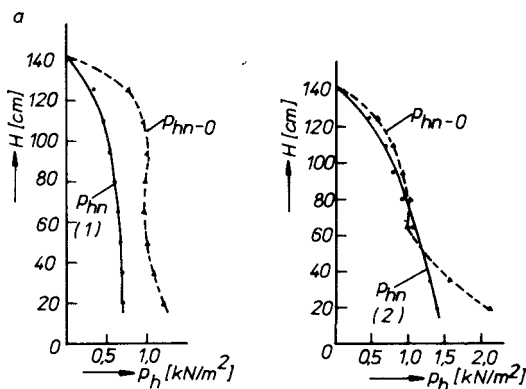
- równomierne napełnianie na całej powierzchni przekroju poziomego komory, tzw. napełnianie "deszczem",
- symetryczne napełnianie przez jeden otwór zapasowy usytuowany w osi komory zbiornika, tzw. napełnianie "strugą",
- napełnianie wzdłuż obwodu przekroju poziomego ścian komory.

Schematy sposobów napełniania oraz rozkłady naporu kukurydzy na dno zbiornika przedstawiono na rys. 4.71a.

Wyniki pomiarów uzyskanych przez Saula udowadniają istnienie znacznego wpływu sposobu napełniania zbiornika na charakter rozkładu i wartość naporu materiału sypkiego działającego na płaskie dno. Napełnianie "deszczem" (krzywa 1, rys. 4.71a) nie wywołuje większych nierównomierności w rozkładzie naporu na dno. Napełnianie "strugą" zmienia znacznie rozkład naporu. Przy tym sposobie napełniania wartości maksymalne naporu występują w osi komory (krzywa 2, rys. 4.71a). Po napełnieniu zbiornika wzdłuż obwodu jego ścian nierównomierność rozkładu naporu jest największa. W osi silosu wartości naporu na dno są najmniejsze, natomiast maksymalne wartości naporu występują w odległości równej $1/4$ wymiaru boku komory od ściany zbiornika (krzywa 3, rys. 4.71a). Badania Saula zostały potwierdzone przez Iotaki, którego wyniki pomiarów przedstawiono w pracy [3].

Stroppel [151] badał rozkład naporu jęczmienia na dno modelu zbiornika szerokości 100 cm i wysokości 50 cm. Długość przekroju poziomego modelu była znacznie większa od jego szerokości, co zapewniało wyeliminowanie wpływu poprzecznych ścian na wyniki pomiarów. Jęczmień zasypywany był do zbiornika "deszczem" lub "strugą".

Jakkolwiek przedstawione na rys. 4.71b wyniki badań Stroppela potwierdzają również istnienie wpływu sposobu napełniania komory na rozkład naporu materiału sypkiego na dno, to jednak podczas napełniania "strugą" rozkład naporu różni się od wyników pomiarów uzyskanych przez Saula. Rozbieżności te można tłumaczyć zastosowaniem przez Stroppela innego materiału sypkiego oraz innej wysokości napełniania zbiornika.



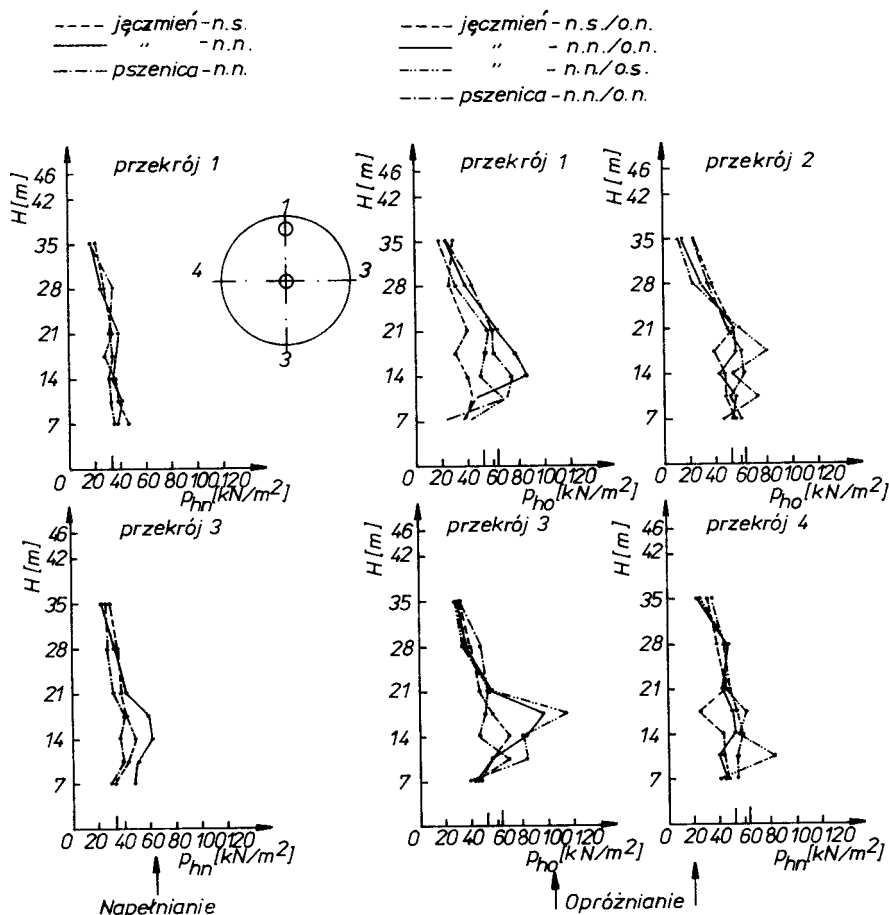
Rys.4.72. Wykresy naporu poziomego według badań Boruszaka i Sygulskiego [13]: a - napełnianie "deszczem", b - napełnianie "strugą"
 Fig.4.72. Horizontal pressures acc. to the studies by Boruszak and Sygulski [13]: a - "rain" filling, b - "stream" filling

Platonow i inni [133] przedstawili wyniki badań naporu poziomego pszenicy w komorze zblokowanej baterii silosów o średnicy 6,0 m i wysokości 30 m. Napełniania badanej komory dokonywano symetrycznie "strugą" lub wzdłuż kołowego obwodu ściany. Wyniki tych pomiarów (rys. 4.71c) wykazały, że maksymalny wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania wystąpił wtedy, gdy komora napełniona została "strugą". Wartość tego wzrostu na poziomie 18 m wynosiła 138% (krzywe 2, rys. 4.71c). Napełnienie komory wzdłuż obwodu ścian wywołało wzrost wartości naporu poziomego jedynie o 30-40% (krzywe 3, rys. 4.71c).

Paul [117] wykonał pomiary naporu jęczmienia w trakcie napełniania modelu cylindrycznego silosu o średnicy 60 cm i wysokości 120 cm, wyłożonego wewnątrz papierem ściernym. Silos napełniano równomiernie na całej powierzchni "deszczem" lub przez nasypowy otwór $\varnothing 12$ usytuowany w osi komory (napełnianie "strugą"). Wyniki pomiarów przedstawione na rys. 4.71d wykazały, że napełnianie "strugą" w porównaniu do napełniania "deszczem" prowadzi do powstania większych wartości naporu poziomego. Paul nie przedstawił niestety wpływu sposobów napełniania na wartość naporu poziomego jęczmienia w trakcie opróżniania, dlatego jego wyniki trudno porównać do wyników badań Platonowa.

Boruszak i Sygulski [13] wykonali pomiary naporu rzepaku w dwóch modelach silosów. Jeden z modeli miał przekrój komory kwadratowy, drugi zaś kołowy. Wymiary modeli były następujące:

- model silosu kwadratowego: przekrój 30 x 30 cm, wysokość komory 160 cm,
- model silosu okrągłego: średnica 24 cm, wysokość komory 130 cm.



Rys.4.73. Wykresy naporu poziomego pomierzonego przez Nielsena i Andersena na ścianach silosu w skali naturalnej [107]

Fig.4.73. Horizontal pressures measured by Nielsen and Andersen acting on the full-size silo walls [107]

Modele napełniano "deszczem" lub "strugą". Badania wykazały, że napełnianie silosu "deszczem" powoduje zmniejszenie naporu działającego na ściany komory zarówno po napełnieniu, jak i podczas opróżniania. Wyniki badań modelu kwadratowego komory silosu przedstawiono na rys.4.72.

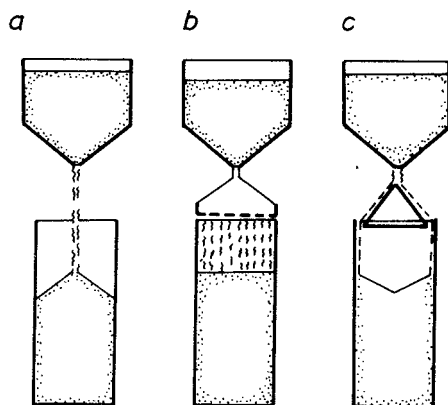
Boruszak i Sygulski zauważyli, że podczas opróżniania modelu silosu napełnianego wcześniej "strugą" przepływ słupa materiału sypkiego w komorze odbywał się skokowo, czemu towarzyszyły charakterystyczne dźwięki. Skokowe obniżanie się poziomu materiału sypkiego było przyczyną powstawania drgań ścian komory silosu, których częstotliwość zależała od intensywności opróżniania.

Wpływ sposobu napełniania silosu na wartości naporu poziomego zboża działającego na ściany komory wynika również z badań Nielsena i Andersena [107]. Pomiary naporu poziomego wykonali oni w komorze baterii silosów o średnicy 7,0 m i wysokości 46 m. Komorę obciążano jęczmieniem lub pszenicą. Napełnianie komory dokonywane mogło być "strugą" symetrycznie lub niesymetrycznie. Silos opróżniano przez otwór wysypowy usytuowany w osi komory lub bezpośrednio przy jej ścianie. Wyniki badań przedstawiono na rys. 4.73.

W przypadku napełniania komory jęczmieniem maksymalne różnice w wartościach naporu spowodowane niesymetrycznym sposobem napełniania wystąpiły na ścianie w miejscu zasypywania ziarna (przekrój 3, rys. 4.73) i wynosiły nawet 30% (np. na poziomie 17,5 m). Podczas opróżniania niesymetrycznego komory z jęczmieniem różnice spowodowane różnymi sposobami napełniania zwiększyły się i wynosiły ok. 60% w przekroju 1 i 3 (poziom również 17,5 m).

4.6.2. Wyniki badań własnych i ich analiza

Pomiary prowadzono na modelu stalowego silosu cylindrycznego o średnicy 515 mm i wysokości 1015 mm. Konstrukcję modelu, zastosowane czujniki i aparaturę opisano w p. 4.2.3.



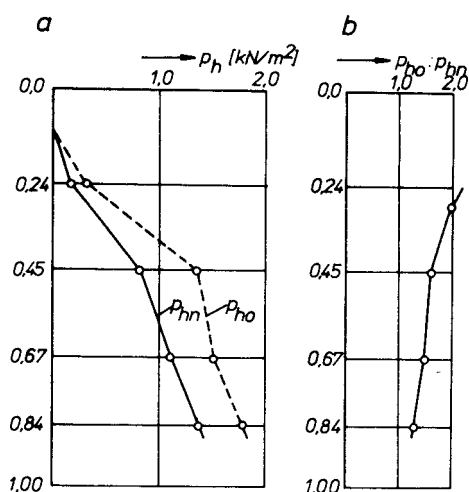
Rys. 4.74. Schematy różnych sposobów napełniania modelu silosu: a - napełnianie "strugą", b - napełnianie "deszczem", c - napełnianie wzdłuż obwodu ściany komory

Fig. 4.74. Different methods of filling a silo: a - "stream" filling, b - "rain" filling, c - filling along the hoop

Napełniania modelu dokonywano ze zbiornika zasypowego o pojemności około $1,5 \text{ m}^3$, umieszczonego bezpośrednio nad stanowiskiem badawczym na rusztowaniu z rur stalowych.

Wartości naporu poziomego pszenicy w trakcie napełniania
i opróżniania modelu silosu

Rzędna wysokości z : H	Napór różnymi sposobami napełniania (kN/m^2)					
	napełnienie strugą		napełnienie deszczem		napełnienie przy ścianach	
	P_{hn}	P_{ho}	P_{hn}	P_{ho}	P_{hn}	P_{ho}
0,24	0,130	0,280	0,140	0,180	0,147	0,167
0,45	0,825	1,330	0,757	1,091	0,642	0,974
0,67	1,100	1,640	0,692	0,979	0,683	0,661
0,84	1,374	1,798	0,679	0,933	0,577	0,865



Rys.4-75. Wyniki badań silosu napełnianego "strugą": a - wykresy naporu pszenicy (P_{hn} - napełnianie, P_{ho} - opróżnianie), b - wykresy współczynnika zmiany wartości naporu w trakcie opróżniania modelu

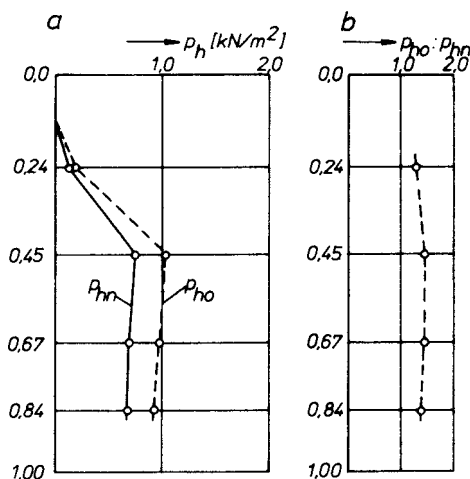
Fig.4.75. Measurement results for a "stream" filled silo, a - wheat horizontal pressures, b - P_{hn} - filling, P_{ho} - discharging, b-the coefficient of pressure variations during discharging

za pomocą suwnicy ponad zbiornik zasypowy, gdzie następowało jego opróżnianie.

W trakcie napełniania i opróżniania dokonywano jednoczesnego pomiaru wartości naporu poziomego i globalnego obciążenia pionowego ściany i dna modelu silosu.

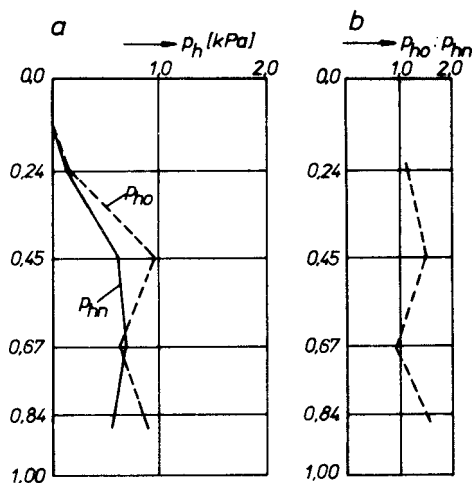
Zastosowano trzy różne sposoby napełniania silosu (rys. 4.74). Pierwszy, tzw. "strugą", polegał na bezpośrednim napełnianiu modelu w osi komory ze zbiornika zasypowego przez otwór o średnicy 25 mm. Drugi sposób - napełnianie "deszczem" - polegał na ustawieniu bezpośrednio nad komorą modelu płaskiej płyty z gęsto nawierconymi otworami o średnicy $\varnothing$ 20 mm. Trzeci rodzaj napełniania wzdłuż poziomego obwodu ścian komory wykonano dzięki zainstalowaniu pod zbiornikiem zasypowym stalowego stożka o tworzącej pochylonej pod kątem 40° .

Pszenicę odbierano przez otwór wysypowy usytuowany w osi komory do trzech cylindrycznych pojemników umieszczonych obok badanego modelu silosu. Po napełnieniu pojemnik podnoszono



Rys.4.76. Wyniki badań silosu napełnianego przy ścianach: a, b - jak na rys. 4.58

Fig.4.76. Measurement results for a silo filled along the walls: a, b - the same as fig. 4.58



Rys.4.77. Wyniki badań silosu napełnianego "deszczem": a, b - jak na rys. 4.58

Fig.4.77. Measurement results for a "rairie" filled silo: a, b - the same as in fig. 4.58

Na rysunkach 4.75-4.78 przedstawiono wykresy naporu poziomego pszenicy dla trzech różnych sposobów napełniania komory modelu silosu. Wyniki liczbowe pomiarów zestawiono w tab.4.23.

Największe wartości naporu otrzymano w silosie napełnianym "strugą" (rys.4.75). W tym przypadku również wystąpił maksymalny wzrost wartości naporu w trakcie opróżniania. Iloraz wartości naporu opróżniania i napełniania ($p_{ho} : p_{hn}$) wynosi od 1,31 do 2,15 (średnia wartość 1,64).

Napełnianie modelu silosu "przy ścianach" za pomocą stalowego stożka spowodowało znaczną redukcję wartości naporu pszenicy (rys.4.76). Również wzrost naporu w trakcie opróżniania komory był niewielki. Wartości ilorazu naporu opróżniania i napełniania wynoszą od 0,97 do 1,50 (średnia wartość 1,28).

W modelu napełnianym "deszczem" (rys.4.77) pomierzone wartości naporu poziomego są większe aniżeli w modelu napełnianym za pomocą stożka, mniejsze zaś od wartości występujących w silosie napełnianym "strugą" (średnia wartość ilorazu $p_{he} : p_{hf} = 1,38$).

W tabeli 4.24 zestawiono wyniki pomiaru pionowych obciążeń ścian i dna modelu silosu napełnianego trzema opisanymi sposobami.

Porównując na przykład obciążenie dna modelu silosu po jego napełnieniu można stwierdzić, że maksymalna wartość obciążenia dna występuje podczas napełniania modelu przy ścianach, minimalna zaś w modelu napeł-

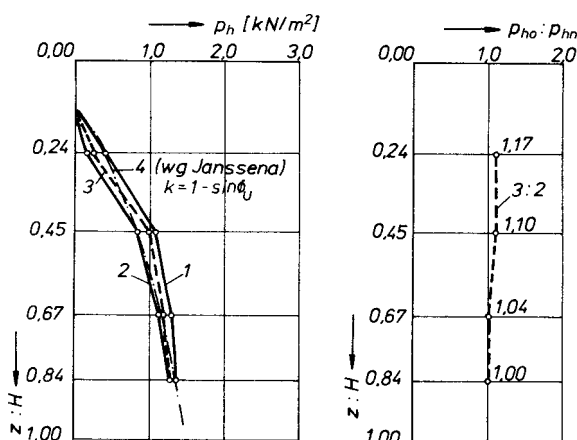
Wartości obciążeń pionowych ścian i dna modelu silosu pszenicą

Element konstrukcji modelu	Wartość obciążenia pionowego (N)					
	napełnianie strugą		napełnianie deszczem		napełnianie przy ścianach	
	Q_n	Q_o	Q_n	Q_n	Q_n	Q_o
ściana	633	652	606	738	511	567
dno	1084	939	1125	1031	1133	947

Q_n - obciążenie po napełnieniu komory,

Q_o - obciążenie w trakcie opróżniania.

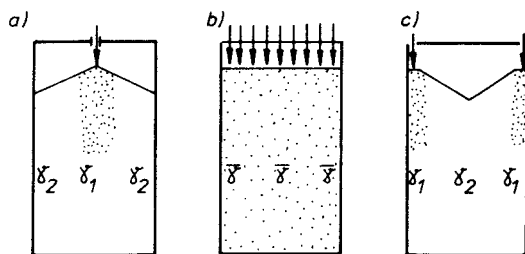
nianym strugą. Z kolei pionowe obciążenie ściany pochodzące od sił tarcia przybiera największą wartość podczas napełniania silosu "strugą", najmniejszą zaś w silosie napełnianym za pomocą stożka. Rozkład obciążeń działających na ściany i dno silosu potwierdza w pełni wyniki pomiarów wartości naporu poziomego.



Rys.4.78. Wpływ sposobów napełniania na wartość naporu poziomego cukru: 1 - napełnianie "strugą", 2 - napełnianie wzdłuż obwodu ściany komory, 3 - napór w trakcie opróżniania w modelu napełnianym wzdłuż obwodu ściany komory

Fig.4.78. The effect of the way a silo is filled on the value of the sugar horizontal pressure: 1 - "stream" filling, 2-filling along the hoop of walls, 3 - pressure at discharging of the model filled along the hoop of the walls

Identyczne badania wykonał autor w tym samym modelu silosu napełniony go cukrem. Przedstawione na rys. 4.78 wyniki pomiarów naporu cukru potwierdzają wpływ sposobu napełniania na wartości naporu poziomego działającego na ściany silosu. W silosie obciążonym cukrem wzajemne



Rys.4.79. Rozkład gęstości układania się ziaren materiału sypkiego w przekroju silosu: a - napełnianie "strugą", b - napełnianie "deszczem", c - napełnianie wzdłuż obwodu ściany komory
Fig.4.79. Density distribution of bulk solid grains across the silo section: a - "stream" filling, b - "rain" filling, c - filling along the hoop of the walls

różnice wartości naporu są znacznie mniejsze aniżeli podczas obciążania modelu pszenicą. Charakterystyczne dla cukru są również mniejsze wartości naporu w trakcie opróżniania modelu napełnianego wzdłuż obwodu ścian od wartości naporu pomierzonego bezpośrednio po napełnieniu modelu "strugą".

Uzyskane wyniki badań można wyjaśnić przez analizę gęstości układania się ziaren pszenicy w przekroju poziomym komory silosu. Gęstość ta zależy od sposobu zasypywania, wysokości spadania oraz granulacji ziaren.

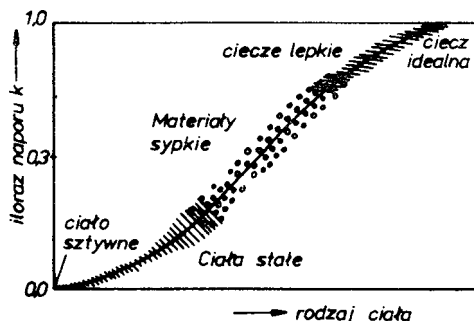
Prawdopodobny rozkład gęstości wzdłuż średnicy komory w zależności od sposobu napełniania silosu przedstawiono na rys. 4.79..

Podczas zasypywania silosu "strugą" maksymalna gęstość układania się ziaren wystąpi w osi komory. Podczas zasypywania "deszczem" można przyjąć, że w całym przekroju silosu wartość gęstości będzie taka sama. Zasypywanie za pomocą stożka spowoduje największe zagęszczenie materiału sypkiego przy ścianach silosu.

Z gęstością materiału sypkiego związana jest wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz iloraz naporu poziomego i pionowego

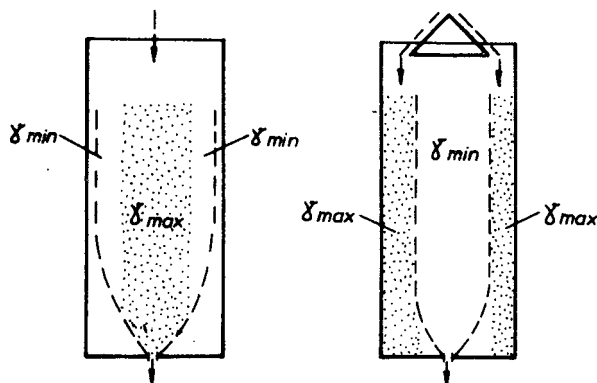
$$k = p_h : p_v \quad (4.54)$$

Wartość ilorazu k przy stałym p_v decyduje o wartości naporu poziomego. Według Kezdiego [78] iloraz k zależy od wielkości energii zgromadzonej w danym ciele. Zależność tę przedstawiono na rys. 4.80. Na przykład w ciałach sztywnych współczynnik k równy jest zero, zaś w cieczy idealnej osiąga on największą wartość, tzn. $k = 1,0$. Współczynniki od 0,4 do 0,6 są charakterystyczne dla materiałów sypkich znajdujących się w spoczynku. Gdy są większe siły spójności, a więc większy kąt tarcia wewnętrznego, wówczas dochodzimy do obszaru przejściowego, którymi są ciała stałe. Gdy kąt tarcia wewnętrznego natomiast zmniejsza się, przechodzi się do obszaru przejściowego obejmującego ciecze lepkie (rys.4.80).



Rys.4.80. Zmiana wartości ilorazu poziomego i pionowego naporu dla różnych materiałów [78]

Fig.4.80. Change in the value of horizontal-to-vertical pressure ratio for different materials [78]



Rys.4.81. Schematy przepływu zboża podczas opróżniania komór silosów napełnionych wcześniej różnymi sposobami: a - po napełnieniu "strugą", b - po napełnieniu wzdłuż obwodu ściany komory

Fig.4.81. Flow of corn during discharging of a silo filled in different ways: a - after "stream" filling, b - after filling along the hoop of the walls

Terzaghi [155] jako pierwszy określił eksperymentalnie związek napór-gęstość. Stwierdził on, że iloraz k w zagęszczonym piasku jest mniejszy niż w stanie luźnym. Zależność tę potwierdził również Hoffman [48] w badaniach jęczmienia.

W badaniach prowadzonych przez autora niniejszej pracy, w trakcie napełniania modelu silosu za pomocą stożka wystąpiło maksymalne zagęszczenie pszenicy przy ścianach komory. Na podstawie przedstawionych rozważań o zależności ilorazu k zrozumiałe stało się zmniejszenie wartości naporu poziomego w porównaniu do napełniania silosu "strugą".

Różnice występujące w wartościach wzrostu naporu poziomego w badanych modelach w trakcie ich opróżniania można objaśnić różnymi formami przepływu w komorze silosu. Na przykład w silosie napełnianym za pomocą stożka przepływ pszenicy zbliżony jest bardziej do przepływu rdzeniowego. W silosie napełnianym "strugą" ruch materiału sypkiego w wyższych partiach komory przybiera postać przepływu pełnego (rys. 4.81).

Badania własne udowodniły, że sposób napełniania silosu ma istotny wpływ na wartość naporu materiału sypkiego działającego na ściany i dno komory w trakcie jej napełniania i opróżniania. W zakresie opróżniania potwierdziły one wyniki badań Platonowa.

Szczególnie dużą redukcję wartości naporu powoduje napełnianie wzdłuż obwodu poziomego ściany silosu za pomocą stożka zasypowego. W praktyce sposób ten można zrealizować napełniając równomiernie silos przez otwory stropu nadsilosowego, usytuowane wzdłuż wewnętrznego obwodu komory. Otwory zasypowe centralne służyć mogą w tym przypadku jedynie do końcowego dopełnienia komory.

Do porównania wyników pomiarów i prac teoretycznych zastosowano metodę Dreschera [24]. Obliczenia wykonano jedynie dla czynnego stanu naprężeń przyjmawszy hipotezę uplastycznienia materiału sypkiego przy ścianach silosu jako najbardziej zgodną z wynikami doświadczeń opisanych w p. 4.2.3, a dotyczących napełniania "strugą".

Napór poziomy dla różnych sposobów napełniania obliczono przyjmawszy zwiększone wartości kąta tarcia wewnętrznego; dla napełniania deszczem ($\phi_u = 35^\circ$) i napełniania przy ścianach ($\phi_u = 40^\circ$). Kąt tarcia materiału sypkiego o ścianę nie zależy od sposobu napełniania i wynosi $\phi_s = 25^\circ$. Dla założonych wartości kątów tarcia wyrażenia określające napór pionowy mają postać:

- napełnianie "deszczem"

$$p_v = 7,20(1 - e^{-1,110z})$$

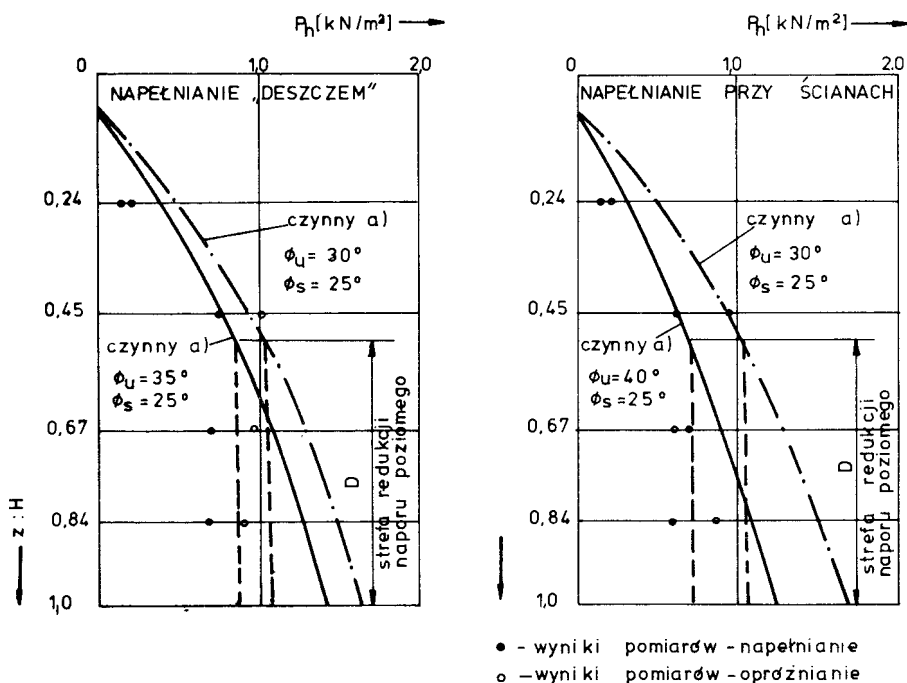
- napełnianie przy ścianach

$$p_v = 9,36(1 - e^{-0,854z}).$$

Fazę opróżniania modelu silosu porównano z rozwiązaniem teoretycznym po przyjęciu aktywnego stanu naprężeń odpowiadającego sposobowi napełniania "strugą" ($\phi_u = 30^\circ$, $\phi_s = 25^\circ$). W tym przypadku napór pionowy wynosi:

$$p_v = 5,42(1 - e^{-1,476z}).$$

Poziomy napór p_h został wyznaczony za pomocą stałej M , której wartość odpowiada propozycji Dreschera dla przypadku uplastycznienia a.



Rys.4.82. Porównanie wyników pomiarów z rozwiązaniem teoretycznym Dreschera
Fig.4.82. Measurement results vs. theoretical solution by Drescher

Z przedstawionych na rys. 4.82 porównań wynika, że rozwiązanie teoretyczne zaproponowane przez Dreschera dość dobrze odzwierciedla wyniki pomiarów w górnej strefie komory silosu pod warunkiem przyjęcia zmiany wartości kąta tarcia wewnętrznego w zależności od sposobu napełniania silosu. W dolnej strefie komory pomierzone wartości naporu poziomego są znacznie mniejsze od obliczonych teoretycznie. Wynika stąd możliwość dokonania redukcji obliczonych wartości naporu przez wrysowanie prostych równoległych do osi pionowych i przecinających teoretyczne wykresy na wysokości równej średnicy silosu D .

Do praktycznych obliczeń inżynierskich proponuje się następujący sposób wyznaczenia wpływu sposobu napełniania komory silosu na napór materiału sypkiego:

1) Napór poziomy w silosie napełnianym "strugą" wyznaczamy metodą Dreschera dla stanu czynnego a przyjmując wartości kątów tarcia ϕ_u i ϕ_s . Stan zmiany naporu podczas opróżniania ustalamy zgodnie z uwagami zawartymi w 4.2.3 zależnie od smukłości komory.

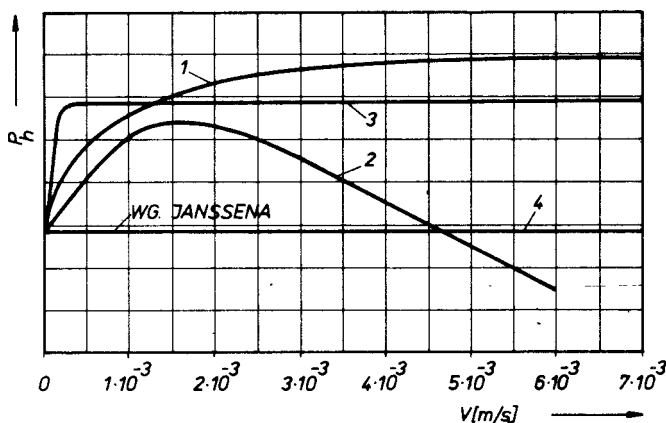
2) W obliczeniach naporu w silosach napełnianych "deszczem" lub "przy ścianach" dla fazy napełniania silosu zakładamy stan czynny a przyjąwszy zwiększone wartości zastępczego kąta tarcia wewnętrznego:

- dla napełniania deszczem $\phi_{uz} = 1,17 \phi_u$
- dla napełniania przy ścianach $\phi_{uz} = 1,33 \phi_u$.

Fazę opróżniania obydwoma sposobami napełniania ustalimy po przyjęciu również stanu naprężeń czynnego a dla wartości kątów tarcia ϕ_u oraz ϕ_s . Zarówno dla fazy napełniania, jak i opróżniania w silosach o smukłości $H:r_h \geq 7,9$, w dolnej strefie komory na wysokości równej średnicy silosu, można dokonać redukcji wartości naporu poziomego na podstawie rys.4.82.

4.7. Intensywność napełniania i opróżniania

Na temat wpływu intensywności napełniania i opróżniania komory silosu na napór materiału sypkiego spotkać można różne poglądy autorów dotychczasowych badań. Na rysunku 4.83 przedstawiono wykresy zmiany naporu poziomego materiału sypkiego w zależności od sztywności opróżniania silosu, uwzględniające trzy różne poglądy na ten temat.



Rys.4.83. Wykresy zmiany naporu poziomego materiału sypkiego w zależności od szybkości obniżania się jego poziomu w komorze silosu [26]; objaśnienia w tekście

Fig.4.83. Changes in the horizontal pressure of a bulk solid as a function of the rate of its drawdown in the silo chamber [26], captions for this figure in the text

Z przedstawionych na tym rysunku wykresów wynika, że większość autorów publikowanych prac uważa, iż maksymalny wzrost wartości naporu poziomego występuje po zmianie prędkości obniżania się poziomu materia-

łu sypkiego podczas opróżniania w granicach od 0 do $(0,5-1,5) \cdot 10^{-3}$ m/s. Dla szybkości większych niż $1,5 \times 10^{-3}$ m/s autorzy otrzymywali różne wyniki.

Krzywa 1 na rys.4.83 obrazuje poglądy, według których napór poziomy materiału sypkiego podczas opróżniania z prędkością większą niż $1,5 \times 10^{-3}$ m/s jest wartością stałą.

Według przebiegu krzywej 2 na tym rysunku napór poziomy osiąga wartości maksymalne przy prędkości opróżniania $1,5 \times 10^{-3}$ m/s. Przy większych prędkościach wartości naporu szybko zmniejszają się. Pogląd ten odpowiada założeniom teorii dynamicznych sklepień, według której zwiększenie prędkości opróżniania ogranicza warunki sprzyjające powstawaniu sklepień w materiale sypkim, co z kolei prowadzi do zmniejszenia wartości naporu poziomego.

Zgodnie z przebiegiem krzywej 3 na rys.4.83 napór poziomy b szybko ulega zwiększeniu przy prędkościach od 0 do $0,5 \times 10^{-3}$ m/s. Stosowanie większych prędkości nie wywołuje zmian wartości naporu poziomego mających znaczenie praktyczne.

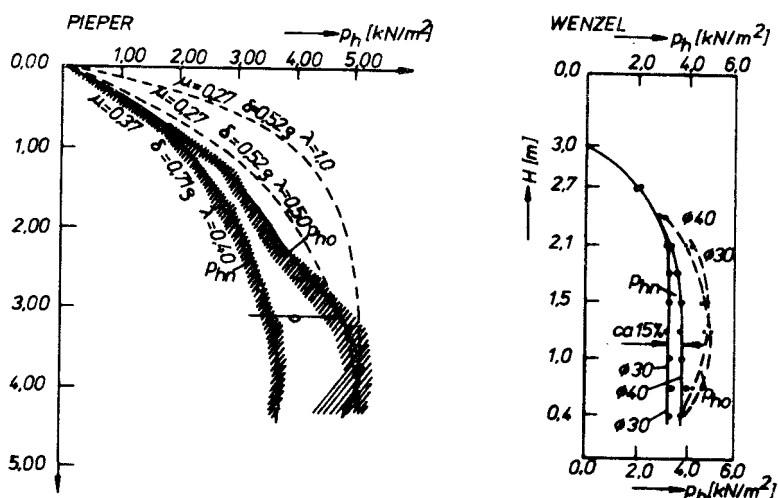
T a b e l a 4.25

Procentowy wpływ intensywności napełniania silosu na zmianę wartości naporu i cech fizycznych piasku [131]

Napór, iloraz naporów lub rodzaj cechy fizycznej	Napełnianie przez otwór $\varnothing$ 30 mm (czas 62 min)	Napełnianie przez otwór $\varnothing$ 40 mm (czas 27 min)
γ_0	100%	101%
P_h		$\leq 115\%$
P_t		$\leq 106\%$
P_v		$\leq 111\%$
k		100%
P_d		95%
tg ϕ		94%

Przebieg krzywej 3 potwierdza większość dotychczasowych badań. Wenzel [162] badał wpływ prędkości napełniania i opróżniania na wartości naporu poziomego piasku w modelu silosu o średnicy 60 cm i wysokości komory 308 cm. Zastosował on dwie prędkości napełniania przez otwory zasypowe o średnicy 30 i 40 mm. Różnice w wartościach naporu poziomego, pomierzonych po napełnieniu komory modelu dwiema prędkościami, nie przekraczały 15%.

W tabeli 4.25 podano za Wenzelą wartości wpływu intensywności napełniania silosu na procentową zmianę wartości naporu poziomego oraz



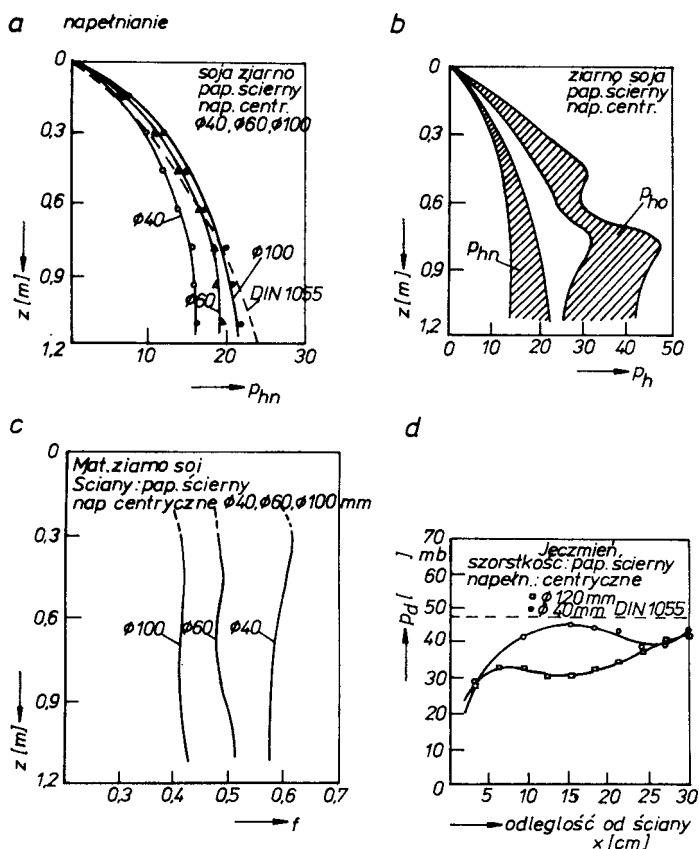
Rys.4.84. Wykresy naporu poziomego materiału sypkiego przy różnych szybkościach napełniania i opróżniania
Fig.4.84. Horizontal pressure of a bulk solid for different rates of filling and discharging

cech fizycznych piasku. Podczas opróżniania stosował Wenzel pięć różnych prędkości, przy których czasy całkowitego opróżniania komory silosu wynosiły: 930, 102, 60, 62 i 27 min. Pomierzone wartości naporu poziomego przy tych prędkościach opróżniania różniły się od siebie jedynie nieznacznie. Również opróżnianie opisanego modelu silosu wypełnionego pszenicą nie wykazało większego wpływu intensywności opróżniania (rys.4.84).

Według Piepera [127] prędkość napełniania i opróżniania silosu ma również nieznaczny wpływ na wartość naporu materiału sypkiego. Podczas pomiarów naporu jęczmienia browarowego w modelu silosu nawet dziesięciokrotna zmiana prędkości napełniania i opróżniania miała niewielki wpływ na zmianę wartości naporu poziomego (rys.4.84). Podczas napełniania modelu silosu zmiana szybkości wywoływała różnice naporu od 7 do 13%, natomiast podczas opróżniania różnice te wynosiły od 9 do 14%.

Paul [117] wykonał pomiary naporu soi i jęczmienia na ściany i dno modelu silosu o średnicy 60 cm i wysokości komory 120 cm na podstawie trzech różnych intensywności napełniania. Dzięki tym pomiarom wykazał, że zwiększenie szybkości napełniania powoduje wzrost wartości obciążenia dna i ścian silosu (rys. 4.85).

Według Paula intensywność napełniania silosu wpływa w dużym stopniu na zmianę wartości współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę komory, który ma zasadnicze znaczenie w obliczaniu wartości naporu. Gdy model silosu napełniano szybciej, wówczas obciążenie dna jęczmieniem było mniejsze aniżeli wtedy, gdy model napełniano wolniej. Paul wykazał rów-

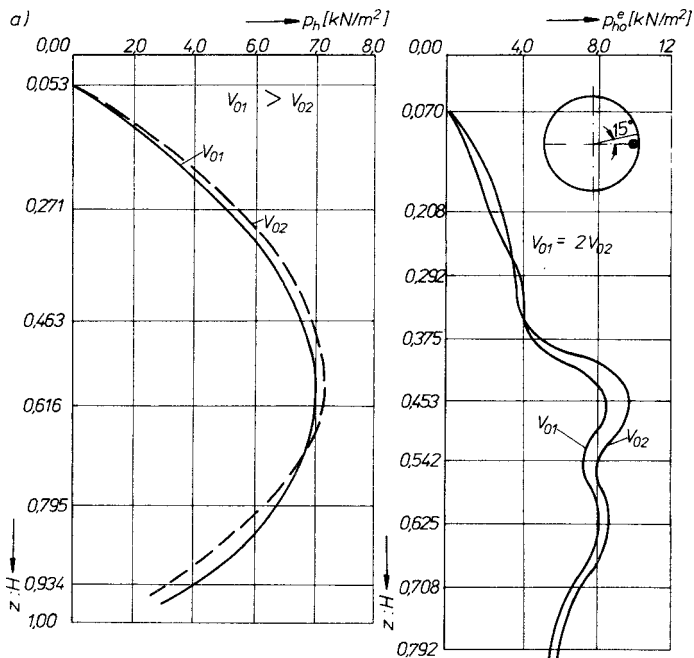


Rys.4.85. Wyniki badań Paula [117]: a - wykresy poziomego naporu soi podczas różnych prędkości napełniania, b - wykresy obszarów zmian wartości naporu poziomego po napełnieniu i podczas opróżniania silosu napełnionego z różnymi intensywnościami, c - wykresy wartości współczynnika tarcia soi o ścianę komory, d - wykresy naporu na dno silosu

Fig.4.85. Results of studies by Paul [117]: a - soybean horizontal pressures for different rates of filling, b - regions of horizontal pressure variations after filling and during discharging of the silo previously filled at different rates, c - value of the coefficient of friction for soybean sliding along the wall, d - pressures on the floor of a silo

nież istnienie dużego wpływu prędkości napełniania silosu na wartości naporu jęczmienia i soi, działającego podczas opróżniania. Wpływ ten był znacznie większy aniżeli w opisanych badaniach Wenzela i Fiepera. Badanie natomiast przez Paula wpływu prędkości opróżniania silosu na wartości naporu jęczmienia i soi nie wykazało większych różnic w wartościach naporu.

Brak wyraźnego wpływu intensywności opróżniania na zmianę wartości naporu poziomego potwierdzono również w badaniach Kamińskiego i Zubrzy-



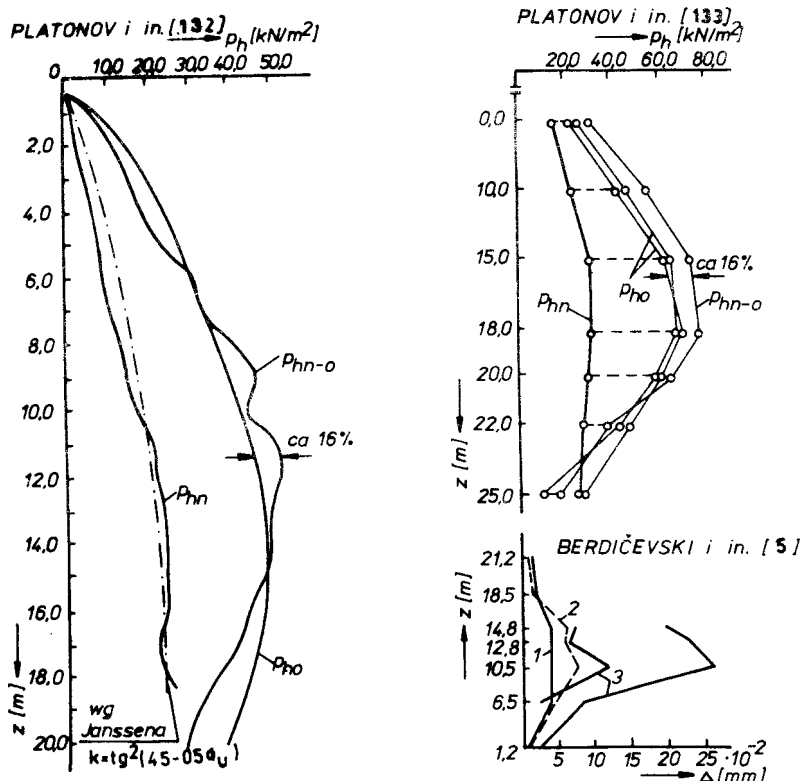
Rys.4.86. Wyniki badań Kamińskiego i Zubrzyckiego [61]: a - wykresy naporu poziomego podczas symetrycznego opróżniania, b - wykresy naporu poziomego w modelu silosu opróżnianym niesymetrycznie (V_{01} , V_{02} - różne intensywności opróżniania)

Fig.4.86. Results of the studies by Kamiński and Zubrzycki [61]: a - horizontal pressures during symmetric discharging, b - horizontal pressures in the model of a silo discharged in a non-symmetric way (V_{01} , V_{02} - different rates of discharging)

ckiego [61]. Autorzy ci wykonali pomiary naporu pszenicy w żelbetowym modelu silosu o średnicy 1,25 m i wysokości 3,77 m. Podczas symetrycznego lub niesymetrycznego opróżniania komory zastosowano dwie różne intensywności opróżniania. Różnice w wartościach naporu poziomego podczas tych pomiarów wynosiły od 5 do 18%. Podczas opróżniania niesymetrycznego i zwiększonej dwukrotnie prędkości występował niewielki, lecz wyraźny, spadek wartości naporu (rys.4.86).

4.8. Wpływ jednoczesnego napełniania i opróżniania

Flatonow, Iwanow i Zamočeniuk [132] badali wpływ jednoczesnego napełniania i opróżniania na napór zboża w prefabrykowanej ośmiokątnej komorze silosu o średnicy opisanego koła 8,0 m i wysokości ścian 30,0 m. Przedstawione na rys. 4.87a wyniki pomiarów wykazały, że podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania silosu występują maksymalne wartości



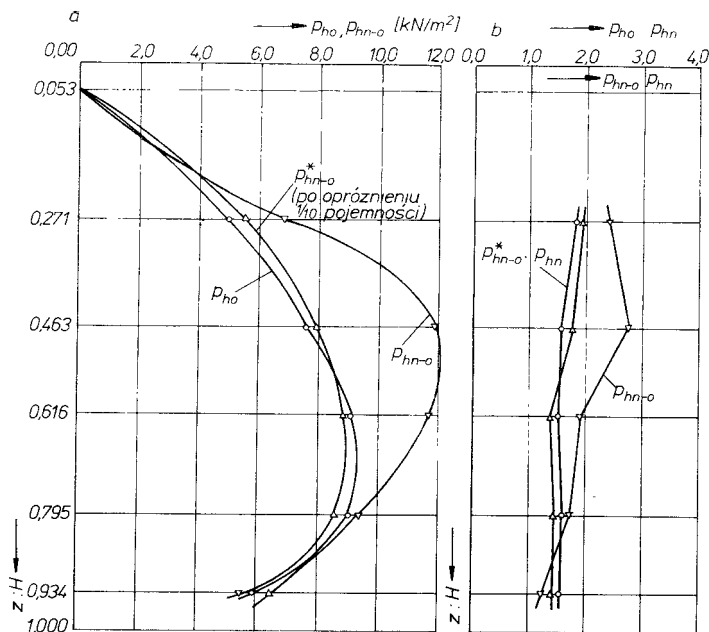
Rys.4.87. Wyniki badań naporu materiału sypkiego podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania (oznaczenia wykresów odkształceń: 1 - po napełnieniu komory, 2 - podczas opróżniania, 3 - w trakcie jednoczesnego napełniania i opróżniania)

Fig.4.87. Results of the studies into the pressure of a bulk solid during simultaneous filling and discharging: 1 - after filling of the chamber, 2 - during discharging, 3 - during simultaneous filling and discharging

naporu poziomego. Wzrost wartości naporu w stosunku do naporu pomierzonego podczas samego opróżniania wynosił około 16%.

Platonow i in. [133] potwierdzili niekorzystny wpływ cyklu jednoczesnego napełniania i opróżniania na wartość wzrostu naporu poziomego. Pomiary wartości naporu pszenicy w komorze baterii silosów o średnicy 6,0 m i wysokości 30 m wykazały wzrost wartości naporu poziomego podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania o podobnej wysokości - jak w opisanych badaniach - komory ośmiokątnej.

Także badania Berdyčevskiego i in. [5] wykazały występowanie maksymalnych odkształceń radialnych ścian podczas cyklu jednoczesnego napełniania i opróżniania komory prefabrykowanego silosu o średnicy 6,0 m (rys. 4.87).



Rys.4.88. Wyniki badań Kamińskiego i Zubrzyckiego [61]: a - wykresy naporu, b - wykresy ilorazu naporów podczas opróżniania i napełniania

Fig.4.88. Results of the studies by Kamiński and Zubrzycki [61]: a - pressure curves, b - discharging-to-filling pressures ratio

Kamiński i Zubrzycki w ramach pracy [61] przedstawili dwa możliwe przypadki rozkładu naporu poziomego pszenicy w trakcie jednoczesnego napełniania i opróżniania komory żelbetowego modelu silosu o średnicy 1,25 m i wysokości 3,77 m (rys. 4.88).

W pierwszym przypadku pomiarów cykl badawczy rozpoczęto od jednoczesnego opróżniania komory i jej dopełniania. Wartości pomierzonego w takim cyklu naporu poziomego wzrosły prawie 56% w stosunku do wartości naporu działającego w trakcie samego opróżniania.

W przypadku drugim najpierw rozpoczęto opróżnianie, a dopiero po opróżnieniu około 1/10 pojemności komory włączono dodatkowe napełnianie silosu. Pomierzone przy tym wartości naporu poziomego wykazywały tylko nieznaczne różnice w stosunku do cyklu zwykłego opróżniania.

Na podstawie prowadzonych wcześniej badań eksperymentalnych bracia Reimbertowie [141] zaproponowali obliczanie wartości naporu poziomego podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania z następującego wzoru:

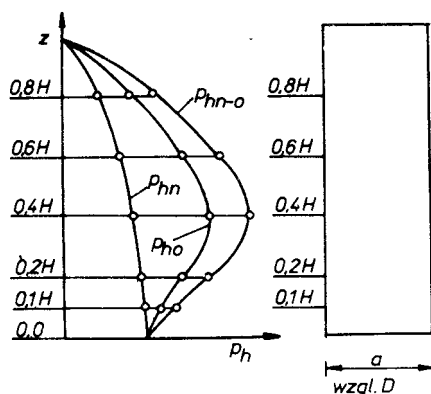
$$p_{hn-o} = n' p_{ho}, \quad (4.57)$$

gdzie n' - współczynnik zmiany naporu podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania. Wartości współczynnika n' zależą od smukłości komory i wysokości strefy silosu (tab.4.26 oraz rys. 4.89).

T a b e l a 4.26

Wartości współczynnika zmiany naporu piasku podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania [141]

Strefa komory	Wartość współczynnika n dla różnych smukłości komór				
	$H : a$ lub $H : 1,12 D$				
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0,8 H	1,14	1,25	1,32	1,39	1,44
0,6 H	1,18	1,26	1,33	1,38	1,42
0,4 H	1,14	1,22	1,27	1,32	1,34
0,2 H	1,15	1,28	1,38	1,45	1,51
0,1 H	1,25	1,30	1,43	1,56	1,67



Rys.4.89. Schemat rozkładu naporu według propozycji Reimbertów [141]
Fig.4.89. Pressure distribution acc. to the Reimberts [141]

T a b e l a 4.27

Wartości współczynnika korekcyjnego do współczynnika zestawionego w tab.4.24 [141]

Materiał sypki	Współczynnik korekcyjny s_k dla różnych poziomów komór				
	0,8 H	0,6 H	0,4 H	0,2 H	0,1 H
pszenica	0,90	1,00	1,00	1,00	1,15
siemię	1,35	1,45	1,65	1,70	1,80

Wartości współczynników n' zamieszczone w tab. 4.25 stosować można jedynie do obliczania naporu piasku. Do obliczania pszenicy lub siemienia zastosować należy dodatkowy współczynnik korekcyjny według tab. 4.27.

Wyniki opisanych badań wskazują, jak niebezpieczne w praktyce może stać się pominięcie wpływu jednoczesnego napełniania i opróżniania. Wzrost wartości naporu poziomego piasku podczas stosowania takiego cyklu może dochodzić zgodnie z badaniami Reimbertów nawet do 67% w porównaniu do naporu występującego w trakcie zwykłego opróżniania. Wzrost wartości naporu nasion siemienia wynosić może aż 300%.

Wpływ jednoczesnego napełniania i opróżniania komory silosu na zwiększenie wartości naporu poziomego można wyjaśnić powstawaniem, w trakcie tego cyklu, sprzyjających warunków do zwiększenia się obszaru przepływu materiału sypkiego. Powiększenie wymiarów rdzenia przepływu objawia się zwiększeniem wzrostu wartości naporu poziomego, a w niektórych przypadkach także pojawieniem się zwiększonej pulsacji naporu. Dokładniejsze wyjaśnienie tego problemu wymagałoby przeprowadzenia badań kinematyki przepływu ośrodka sypkiego.

4.9. Wnioski

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Wzrost naporu poziomego w trakcie opróżniania silosu zależy od smukłości komory. W silosach krępych wzrost wartości tego naporu jest niewielki lub w przypadku niektórych materiałów sypkich może w ogóle nie występować. W komorach o dużej smukłości wzrost naporu poziomego wywołany opróżnianiem może sięgać nawet kilkuset procent.

2. Kształt przekroju poziomego komory silosu decyduje o rozkładzie naporu poziomego materiału sypkiego. W komorach kołowych o stałej sztywności ścian rozkład naporu jest równomierny lub zbliżony do równomiernego. W komorach prostokątnych, gwiazdkowych lub w kształcie krzyża występuje nierównomierny rozkład naporu. Stopień nierównomierności rozkładu powiększa się w trakcie opróżniania silosu.

3. Pochylenie ścian silosu w kierunku do osi komory prowadzi do zmniejszenia wartości naporu poziomego w trakcie napełniania i opróżniania. Kształt dna lub leja silosu wpływa na wartość i rozkład naporu poziomego jedynie podczas opróżniania.

4. Istotny wpływ na wartość naporu materiału sypkiego ma szorstkość ścian komory. W silosach charakteryzujących się zwiększoną szorstkością wewnętrznej powierzchni ścian (np. wykonanych z blachy falistej) wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania jest znacznie mniejszy aniżeli w silosach ze ścianami gładkimi.

5. Szorstkość ścian silosu może się zmieniać w procesie eksploatacji silosu w wyniku wygładzania jej powierzchni przez niektóre gatunki zbóż. Wygładzanie się ścian prowadzi do dużego wzrostu wartości naporu poziomego.

6. Wartości i rozkład naporu materiału sypkiego zależą w dużym stopniu od sztywności konstrukcji komór. Przez zwiększenie podatności ścian lub dna komory można uzyskać znaczną redukcję wartości naporu materiału sypkiego.

7. Występująca często w praktyce zmiana sztywności konstrukcji ścian wzdłuż obwodu komory (np. w komorach zblokowanych lub prefabrykowanych z żebrami) jest przyczyną występowania znacznej nierównomierności rozkładu naporu poziomego. W miejscach o większej sztywności napór materiału sypkiego jest większy. W części ściany bardziej podatnej wartości naporu poziomego są znacznie mniejsze.

8. W komorach silosów zblokowanych wartości naporu zależą od stanu napełniania sąsiednich komór. Wypełnianie komory sąsiedniej zwiększa wartości naporu poziomego o ok. 20%.

9. Wymuszone przemieszczenie ściany silosu w kierunku materiału sypkiego (np. w wyniku zmniejszenia się temperatury zewnętrznej) może wywołać wzrost wartości naporu poziomego od kilkunastu do kilkudziesięciu procent. Wartość tego wzrostu zależy od szybkości przemieszczania się ściany.

10. Podatne podparcie ściany lub dna silosu nie ma istotnego wpływu na wartość naporu poziomego materiału sypkiego działającego po napełnieniu komory. Podatność ta wpływa natomiast decydująco na wartości globalnych obciążeń ściany lub dna silosu.

11. Dzięki podatnemu podparciu ściany silosu można uzyskać redukcję wzrostu naporu poziomego cukru w trakcie opróżniania komory.

12. Pionowe przemieszczanie ściany wymuszone po napełnieniu silosu prowadzi do dużych zmian wartości naporu poziomego i stycznego oraz globalnych obciążeń dna i ściany komory.

13. Znaczący wpływ na wartości i rozkład naporu materiału sypkiego ma sposób napełniania komory. Zastosowanie określonych sposobów napełniania komory, np. wzdłuż obwodu ścian silosu, prowadzi do uzyskania dużej redukcji wartości naporu poziomego.

14. Zastosowanie w eksploatacji silosów cyklu jednoczesnego napełniania i opróżniania komory powoduje wzrost wartości naporu poziomego.

15. Zmiana intensywności napełniania komory nie ma istotnego wpływu na wartości naporu poziomego materiału sypkiego. Wpływ intensywności napełniania silosu miał większe znaczenie jedynie w badaniach obciążeń dna komory.

16. Maksymalny wzrost naporu poziomego występuje po zmianie szybkości obniżania się poziomu materiału sypkiego w granicach od 0 do $1,5 \times 10^{-3}$ m/s. Po zastosowaniu większych intensywności opróżniania wartości naporu poziomego nie ulegają zasadniczym zmianom.

5. OPRÓŻNIANIE NIESYMETRYCZNE SIŁOSÓW

5.1. Wstęp

Wpływ opróżniania niesymetrycznego komór silosowych na wartości i rozkład naporu poziomego materiału sypkiego jest przedmiotem licznych badań eksperymentalnych prowadzonych m.in. w naszym kraju.

Publikacje z tych badań, a także wytyczne zagranicznych norm, zawierają wiele rozbieżności, które utrudniają przyjęcie właściwych schematów obciążeń oraz prawidłowe obliczenie sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych. Obszerne analizy wyników badań opróżnianych niesymetrycznie silosów przedstawiono w pracach [4,6,34,37,40,44,67,79,94,107,112,121 i 137].

Na napór materiału sypkiego zasadniczy wpływ mają następujące czynniki:

- rodzaj i cechy materiału sypkiego
- geometria silosu i zastosowany materiał konstrukcyjny
- warunki eksploatacji.

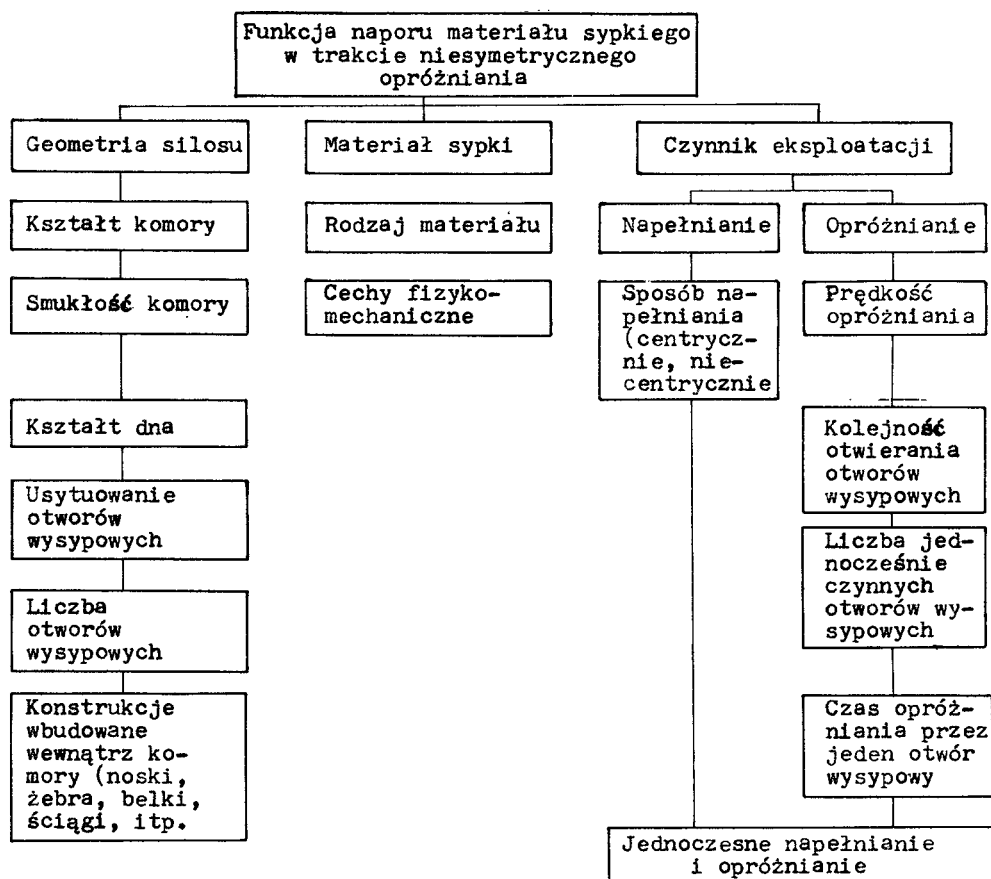
Schemat podziału czynników wpływających na napór materiału sypkiego podczas opróżniania niesymetrycznego silosu przedstawiono na rys.5.1.

5.2. Napór poziomy materiału sypkiego w silosach opróżnianych niesymetrycznie w ujęciu normowym

Wpływ opróżniania niesymetrycznego na napór materiału sypkiego uwzględniono w następujących normach i przepisach zagranicznych:

- SN-261-77 (ZSRR)
- SNBATI Nr 189 (Francja)
- ACI Standard 313-77 (USA)
- TGL Standard 27409 (NRD)
- ČSN 735570 (Czechosłowacja)
- DIN-1055 Bl. 6 (RFN)
- PN-84/B-03262 (Polska).

Najważniejsze dane do obliczeń wartości naporu poziomego materiału sypkiego według wymienionych przepisów normowych przedstawiono na rys.5.2.

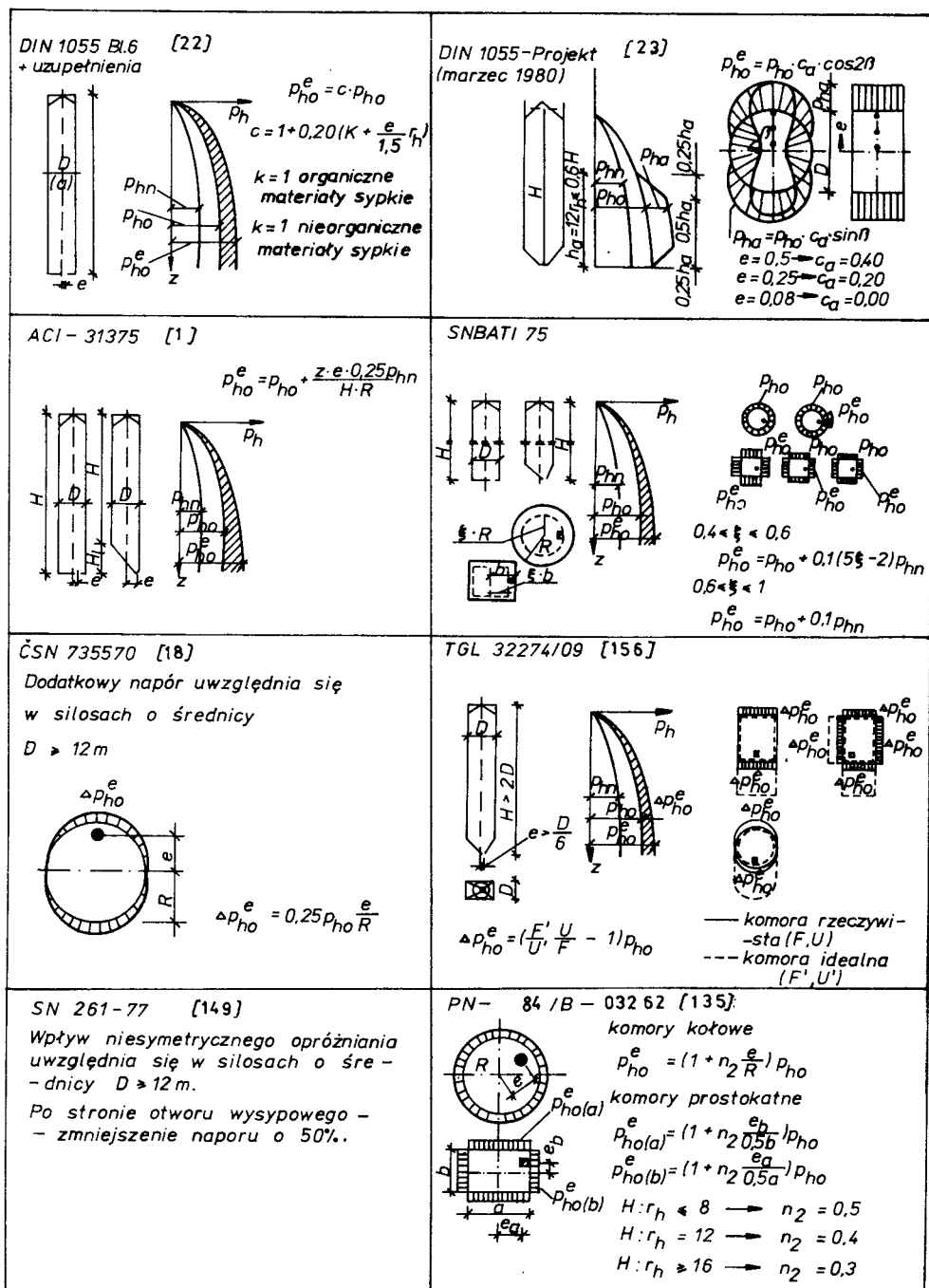


Rys.5.1. Czynniki wpływające na napór materiału sypkiego w silosach opróżnianych niesymetrycznie

Fig.5.1. Factors affecting the pressure of a bulk solid in non-symmetrically discharged silos

W przepisach radzieckich wpływ opróżniania niesymetrycznego uwzględniany jest w obliczeniach silosów o średnicy powyżej 12 m. W silosach tych podczas obliczania naporu poziomego uwzględnia się jego redukcję o 50% po stronie wypływu materiału sypkiego.

Wpływ opróżniania niesymetrycznego w przepisach francuskich uwzględnia się przez przyjęcie do obliczeń kombinacji schematów naporu dla napełniania i opróżniania. Opróżnianie niesymetryczne określa się mianem geometrycznie nienormalnego opróżniania, przy którym rozpatruje się następujące schematy obciążeń:



Rys.5.2. Poziomy napór materiału sypkiego w silosach opróżnianych niesymetrycznie według różnych norm
 Fig.5.2. Horizontal pressure of a bulk solid in non-symmetrically discharged silos according to different standards

- w prostokątnych komorach analizuje się trzy przypadki obciążeń o różnej intensywności naporu poziomego na ścianach komory,

- w silosach o przekroju kołowym analizuje się dwa przypadki obciążeń, z których jeden uwzględnia wzrost naporu poziomego po stronie wpływu materiału sypkiego.

Wartość naporu poziomego według przepisów francuskich zależy zdecydowanie od wielkości mimośrodów otworu wysypowego.

Według amerykańskiej normy ACI 313-77 [1] w silosach opróżnianych niesymetrycznie przyjmuje się wartości naporu poziomego zwiększone w porównaniu do opróżniania symetrycznego o $25(e/R)\%$ (e - mimośród otworu wysypowego względem osi komory, R - geometryczny promień przekroju kołowego komory). Wprawdzie w komentarzu do normy zaleca się uwzględnienie nierównomierności rozkładu naporu poziomego, jednak brak bliższych objaśnień, jak rozkład tego naporu ma wyglądać.

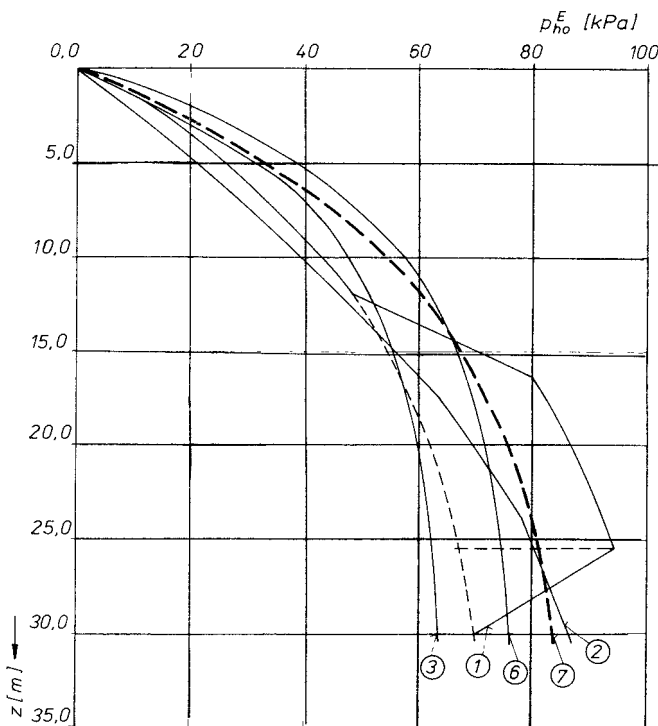
W projekcie normy TGL 3227 [156] zaproponowano sposób obliczania naporu poziomego, który stosowany był w zachodnioniemieckiej normie DIN-1055 przed wprowadzeniem dodatkowych uzupełnień w 1964 r. Wartość naporu określona zostaje dla komory fikcyjnej, dla której otwór wysypowy usytuowany jest centrycznie w osi.

W normie CSN 735-750 [18] wpływ opróżniania niesymetrycznego uwzględnia się w komorach o średnicy $D \geq 12$ m. Za pomocą dodatkowego naporu poziomego o wartości $0,25 p_{ho}(e/R)$ dokonuje się korekty obciążenia ściany komory po stronie otworu wysypowego oraz po jego przeciwnej stronie według rys.5.2.

W projekcie nowej normy DIN-1055 [23] zakłada się dodatkowe zwiększenie wartości naporu poziomego zarówno po stronie otworu wysypowego, jak i na ścianie po przeciwnej stronie. Wzrost w granicach 20-40% (w stosunku do naporu podczas symetrycznego opróżniania) występuje w dolnej strefie silosu na wysokości $h_a = 12 r_h \leq 0,6 H$ (gdzie r_h - hydrauliczny promień komory, H - wysokość komory z lejem). W kierunku obwodowym komory należy analizować dwa różne nierównomierne rozkłady naporu poziomego (w funkcji kosinusowej lub sinusowej).

W opracowanej ostatnio polskiej normie [135] przyjęto symetryczny rozkład naporu poziomego, a jego wartości zależą od mimośrodu otworu wysypowego i smukłości silosu. Wartości naporu poziomego zostały podwyższone do takiego poziomu, aby obliczone zbrojenie w ścianach przenosiło równoleżnikowe siły rozciągające i momenty zginające wynikające z asymetrii obciążenia przyjmowanej według innych norm i propozycji.

Na rysunku 5.3 przedstawiono porównanie wykresów opróżniania niesymetrycznego, sporządzonych według różnych norm dla komory silosu o średnicy 8 m i wysokości 30 m.



Rys.5.3. Wykresy naporu poziomego zboża w silosie opróżnianym niesymetrycznie według różnych przepisów i norm: 1 - DIN-1055 (projekt), 2 - ACI 31377, 3 - SNBATI Nr 189, 6 - TGL 27409, 7 - projekt polskiej normy

Fig.5.3. Corn horizontal pressure in a non-symmetrically discharged silo according to different codes and standards: 1-DIN-1055 (design), 2 - ACI 31377, 3 - SNBATI No. 189, 6 - TGL 27409, 7 - Polish Standard proposal

5.3. Wyniki dodatkowych badań własnych

5.3.1. Opis badań

Badania wykonano na trzech stalowych modelach cylindrycznych silosów i stanowisku pomiarowym szczegółowo opisanym w p. 4.1.3. Jako materiał obciążający zastosowano pszenicę i cukier o przebadanych właściwościach fizycznych (tab.4.6).

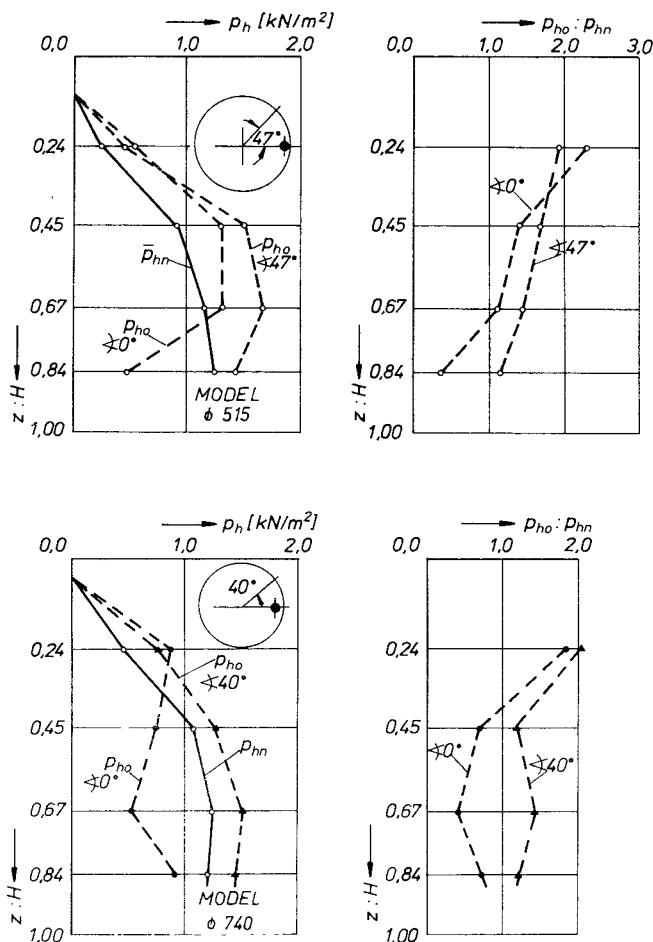
Modele silosów opróżniać można było przez różne otwory wysypowe $\varnothing$ 25 mm, rozmieszczone na całej powierzchni płaskiego dna w odległościach 8 cm.

Celem badań było uzupełnienie brakujących danych o rozkładzie i wartościach naporu poziomego w silosach niskich, a także porównanie

oddziaływań dwóch różnych materiałów sypkich w identycznej komorze siłosu.

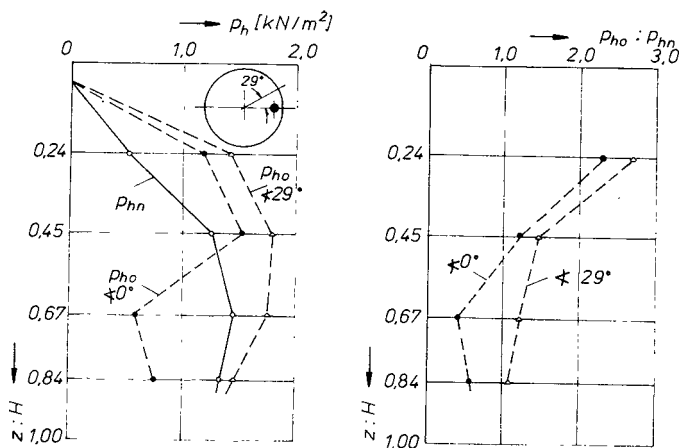
5.3.2. Napór pszenicy

Wyniki pomiarów naporu pszenicy przedstawiono na rys. 5.4 i 5.5. We wszystkich trzech modelach silosów wystąpił jakościowo podobny rozkład naporu poziomego pszenicy.



Rys.5.4. Wykresy naporu poziomego pszenicy w modelach silosów $\phi 515$ mm i $\phi 740$ mm w trakcie napełniania i opróżniania niesymetrycznego przez otwór wyspowy usytuowany przy ścianie komory

Fig.5.4. Wheat horizontal pressures in the models of $\phi 515$ mm and $\phi 740$ mm silos during filling and a non-symmetric discharging through the outlet gate located at the wall of a chamber



Rys.5.5.-Wykresy naporu poziomego pszenicy w modelu silosu $\varnothing$ 1040 mm w trakcie opróżniania niesymetrycznego przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie
 Fig.5.5. Wheat horizontal pressures in a $\varnothing$ 1040 mm silo during a non-symmetric discharge through the outlet gate located at the wall

W trakcie opróżniania w dolnej strefie silosu o przekroju pionowym usytuowanym bezpośrednio po stronie wysypu ($\star 0^\circ$) rejestrowany był spadek wartości naporu poziomego. W górnej strefie silosu zaś, w tym samym przekroju, wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania były zawsze większe od wartości naporu pomierzonego po napełnieniu silosu. W wyniku badań został określony także przekrój boczny, w którym pojawiają się maksymalne wartości naporu poziomego pszenicy w trakcie opróżniania niesymetrycznego. Aby wyznaczyć położenie tego przekroju, wykorzystano liczne wysypowe otwory usytuowane co 8 cm przy ścianie komory. Silos opróżniano kolejno przez właśnie te otwory wysypowe, znajdujące się w coraz większej odległości od pionowego rzędu czujników pomiarowych. Przy jednakowych średnicach otworów wysypowych we wszystkich modelach silosów kąt nachylenia przekroju z maksymalnymi wartościami naporu opróżniania w każdym z tych modeli był inny. Im większa średnica silosu, tym mniejsza jest wartość tego kąta (w modelu $\varnothing$ 515 mm - kąt 47° , w modelu $\varnothing$ 740 mm - kąt 40° , w modelu $\varnothing$ 1040 mm - kąt 29°).

W przekroju pionowym usytuowanym bezpośrednio przy otworze wysypowym maksymalny spadek wartości naporu poziomego pszenicy wynosił 62% (model $\varnothing$ 515 mm), zaś maksymalny wzrost tego naporu w tym przekroju był równy 131% (model $\varnothing$ 1040 mm). Maksymalny wzrost wartości naporu poziomego w przekroju bocznym nastąpił w modelu $\varnothing$ 1040 mm i wynosił 171% naporu napełniania. Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania,

obliczonych z badań opróżnianych niesymetrycznie trzech silosów obciążonych pszenicą, zamieszczono w tab.5.1.

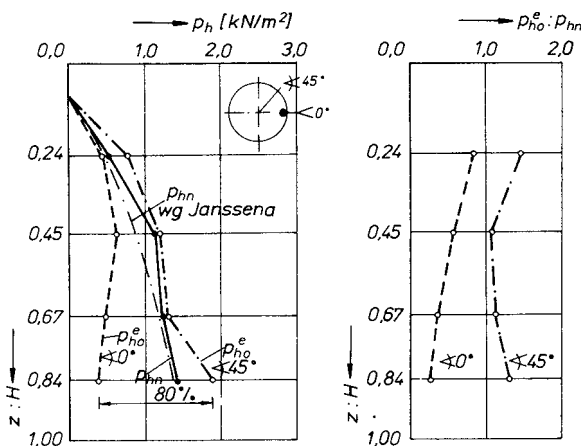
T a b e l a 5.1

Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania
(opróżnianie przez otwór wysypowy usytuowany przy
ścianie komory, materiał sypki: pszenica)

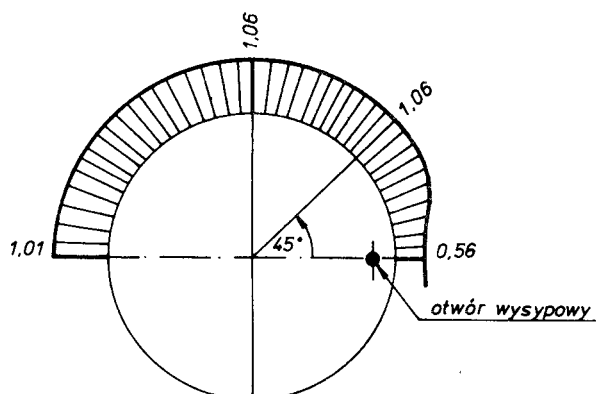
Poziom $z : H$	Iloraz $p_{ho} : p_{hn}$ w zależności od odchylenia badanego przekroju komory od otworu wysypowego					
	model $\varnothing 515$ $H : r_h = 7,9$		model $\varnothing 740$ $H : r_h = 5,5$		model $\varnothing 1040$ $H : r_h = 3,9$	
	$\alpha 0^\circ$	$\alpha 47^\circ$	$\alpha 0^\circ$	$\alpha 40^\circ$	$\alpha 0^\circ$	$\alpha 29^\circ$
0,24	2,3	1,90	1,87	2,01	2,31	2,71
0,45	1,47	1,66	0,69	1,19	1,23	1,44
0,67	1,14	1,45	0,43	1,41	0,40	1,21
0,84	0,38	1,15	0,76	1,21	0,57	1,08

5.3.3. Napór cukru

Na rysunku 5.6 i 5.7 przedstawiono wyniki pomiarów naporu cukru w modelu o średnicy 515 mm, opróżnianego przez otwór wysypowy usytuowany bezpośrednio przy ścianie komory. Z wykresów tych wynika, że w przekroju pionowym usytuowanym po stronie otworu wysypowego występuje spadek



Rys.5.6. Wykresy naporu poziomego cukru w trakcie opróżniania modelu silosu $\varnothing 515$ mm przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie
Fig.5.6. Sugar horizontal pressures during discharging of a $\varnothing 515$ mm model of a silo through the outlet gate located at the wall,



Rys.5.7. Rozkład poziomego naporu cukru w przekroju poziomym komory silosu $\varnothing$ 515 mm w trakcie opróżniania przez wysypowy otwór usytuowany przy ścianie (poziom $z : H = 0,45$, na wykresie podano wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania)

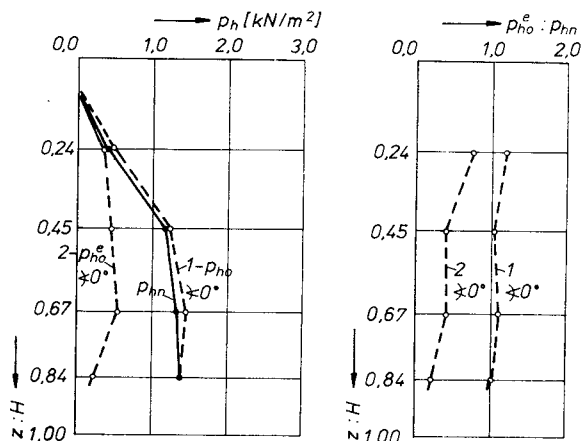
Fig.5.7. Sugar horizontal pressure distribution across the transverse section of a $\varnothing$ 515 mm silo during discharging through the outlet gate, located at the wall (level $z : H = 0.45$, in the diagram the values of filling-to-discharging pressures ratio are given)

wartości naporu w granicach 15-69% w zależności od poziomu wysokości ściany komory. W przekrojach bocznych wyznaczonych przez kąt 45° występuje wzrost naporu od 10 do 47%. Jest to bardzo niekorzystny rozkład naporu, bowiem wywołuje on znaczne wartości zginanych momentów zarówno w przekroju pionowym, jak i poziomym powłoki silosu. W trakcie opróżniania niesymetrycznego pojawia się dodatkowo pulsacja naporu o częstotliwości od 0,20 do 1 Hz. Iloraz wartości maksymalnej i minimalnej naporu wynosi około 0,8.

W celu ograniczenia niekorzystnych skutków opróżniania niesymetrycznego podjęto próbę dokonania optymalizacji tego procesu. Optymalizacja procesu opróżniania modelu silosu o średnicy 515 mm polegała na określeniu ilości cukru pobieranego przez otwory wysypowe, usytuowane na różnych mimośrodkach, przy których nie występowały rozkłady obciążeń bardziej niekorzystne aniżeli w trakcie opróżniania symetrycznego. Pierwszy cykl badawczy zrealizowano na podstawie instrukcji opróżniania komór stosowanej w praktyce przez użytkowników silosów na cukier. Instrukcja ta nakazuje opróżniać komorę początkowo przez otwór usytuowany w osi silosu aż do usunięcia stożka nasypowego materiału sypkiego. Następnie instrukcja zezwala włączyć otwory skrajne. Wyniki pomiarów dokonanych w trakcie takiego sposobu opróżniania przedstawiono na rys.5.8.

Na podstawie wykresów przedstawionych na tym rysunku można stwierdzić, że przejście do opróżniania przez otwory skrajne bezpośrednio po

likwidacji stożka nasypowego jest za wczesne, bowiem powoduje nierównomierność rozkładu naporu podobną jak w przypadku rozpoczęcia opróżniania przez otwory usytuowane przy ścianie.



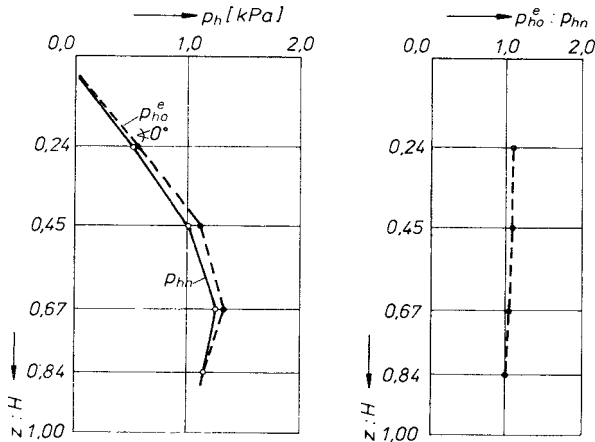
Rys.5.8. Wykresy naporu poziomego cukru w trakcie opróżniania modelu silosu $\varnothing$ 515 mm przez otwory wysypowe usytuowane na różnych mimośrodkach: 1 - opróżnianie do likwidacji stożka nasypowego przez otwór usytuowany w osi komory, 2 - opróżnianie po likwidacji stożka przez otwór usytuowany przy ścianie komory

Fig.5.8. Sugar horizontal pressures during discharging of a $\varnothing$ 515 mm model of a silo through the outlet gates located at different eccentrics: 1 - discharging through the outlet gate in axis with the chamber until the mound cone vanishes, 2 - discharging through the outlet gate at the wall, after vanishing of the mound cone

T a b e l a 5.2

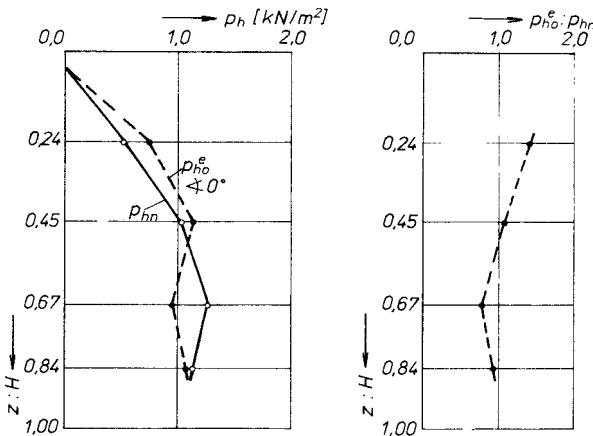
Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania wyznaczonych dla niesymetrycznego opróżniania modelu $\varnothing$ 515 mm (materiał sypki: cukier)

Poziom $z : H$	Wartości ilorazu $p_{ho}^e : p_{hn}$			
	Opróżnianie niesymetryczne $e = 0,4 D$		Optymalizacja opróżniania (opróżnianie wg instrukcji)	
	Przekrój naprzeciwko otworu, $\angle 0^\circ$	Przekrój boczny 45°	Przekrój naprzeciwko otworu wysypowego, $\angle 0^\circ$	
			do likwidacji stożka nasypowego $p_{ho} : p_{hn}$	po likwidacji stożka nasypowego $p_{ho} : p_{hn}$
0,24	0,85	1,47	1,20	0,75
0,45	0,56	1,06	1,10	0,40
0,67	0,35	1,10	1,09	0,41
0,84	0,31	1,31	1,00	0,20



Rys.5.9. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu ϕ 740 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,18 D$ względem osi komory

Fig.5.9. Sugar horizontal pressures in a ϕ 740 mm model of a silo during discharging through the outlet gate eccentric to the axis of the chamber, $e = 0,18 D$



Rys.5.10. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu ϕ 740 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,27 D$

Fig.5.10. Sugar horizontal pressures in a ϕ 740 mm model of a silo during discharging through the outlet gate eccentric to the axis of the chamber, $e = 0,38 D$ (outlet gate at the wall)

Następne pomiary pozwoliły na określenie następującej optymalnej kolejności opróżniania komory silosu:

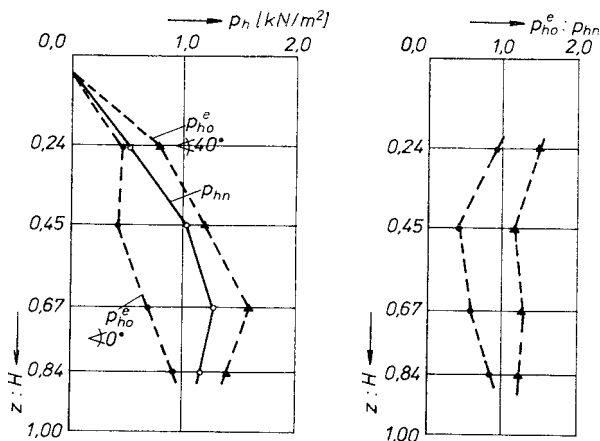
a) przez otwór centralny należy opróżniać zasadniczą pojemność komory do momentu utworzenia się leja sięgającego dna silosu,

b) pozostałą część cukru należy pobierać kolejno przez otwory usytuowane wokół otworu centralnego,

c) przez otwory skrajne usytuowane najbliżej ściany można usuwać tylko resztki cukru pozostającego w komorze pod koniec procesu opróżniania.

Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania z badań modelu o średnicy 515 mm zamieszczono w tab. 5.2.

W modelu silosu o średnicy 740 mm wykonano dodatkowe pomiary naporu cukru w trakcie opróżniania przez otwory wysypowe usytuowane na różnych mimośrodkach względem osi komory. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 5.9-5.11.



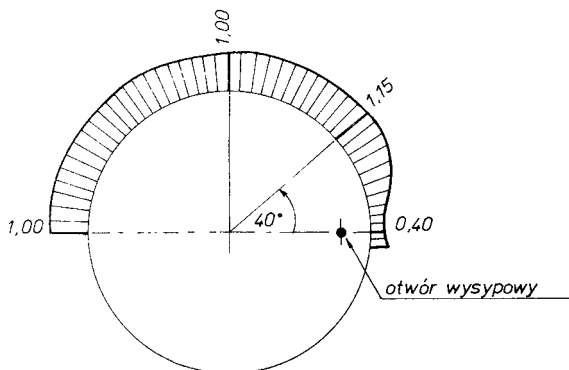
Rys.5.11. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu ϕ 740 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,38 D$ (otwór przy ścianie)

Fig.5.11. Diagramms of horizontal sugar pressure in a silo model $D_{ia} = 740$ mm during excentriccally discharging ($e = 0,38 D$, outlet near the wall)

W trakcie opróżniania modelu silosu przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,18 D$ względem komory (rys.5.9) wystąpiły jedynie nieznaczne zmiany wartości naporu. Obliczone wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania są takie same jak podczas symetrycznego opróżniania od 1,00 do 1,07.

Większe zmiany w rozkładzie naporu poziomego zachodzące w trakcie opróżniania silosu przez otwór usytuowany na mimośrodku $e = 0,27 D$ (rys.5.10). W dolnej strefie komory w przekroju pionowym po stronie otworu wysypowego wystąpił spadek wartości naporu, w górnej zaś strefie wartości naporu były znacznie większe niżeli podczas napełniania

silosu. Na poziomie $z : H = 0,24$ maksymalna wartość ilorazu naporów opróżniania i napełniania wynosiła 1.42.



Rys.5.12. Rozkład naporu poziomego cukru w przekroju poziomym modelu silosu $\varnothing 740$ mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie (poziom $z : H = 0,45$, na wykresie podano wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania)

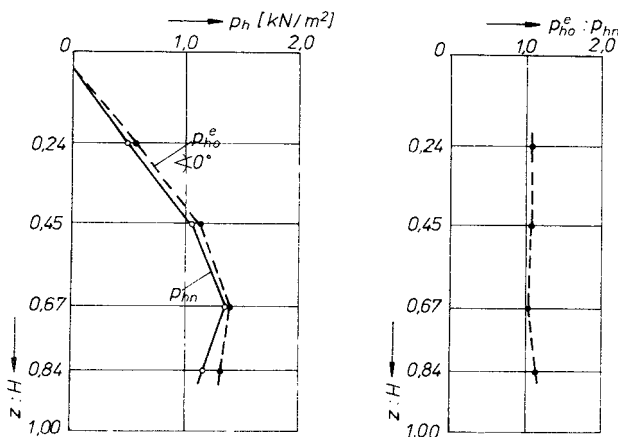
Fig.5.12. Sugar horizontal pressures across the transverse section of a $\varnothing 740$ mm model of a silo during discharging through the outlet gate located at the wall (level $z : H = 0,45$, in the diagram the values of filling-to-discharging pressures ratio are given)

T a b e l a 5.3

Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania wyznaczonych dla niesymetrycznego opróżniania modelu $\varnothing 740$ mm (materiał sypki cukier)

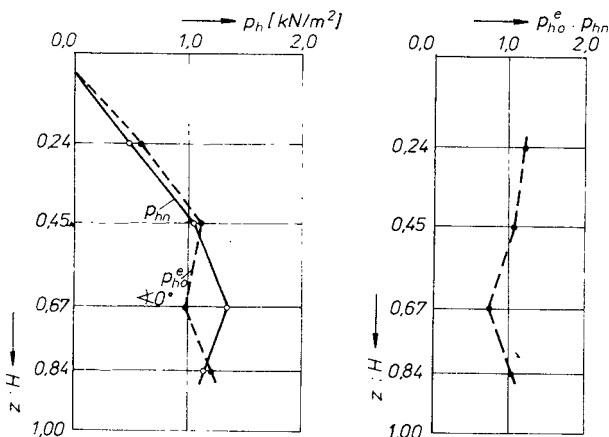
Poziom $z : H$	Wartości ilorazu p_{ho}^e i p_{hn} dla różnych mimośrodów usytuowania otworu wysypowego			
	$e = 0,18 D$	$e = 0,22 D$	$e = 0,38 D$	
			przekrój boczny $\angle 40^\circ$	naprzeciw otworu $\angle 0^\circ$
0,24	1,07	1,42	2,49	0,91
0,45	1,07	1,07	1,15	0,40
0,67	1,03	0,77	1,25	0,55
0,84	1,00	0,94	1,21	0,81

W trakcie opróżniania modelu przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie komory (rys.5.11 i 5.12) pojawia się największa nierównomierność rozkładu naporu poziomego. Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania wynoszą od 0,40 do 1,49.



Rys.5.13. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu $\varnothing$ 1040 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,19$ D względem osi komory

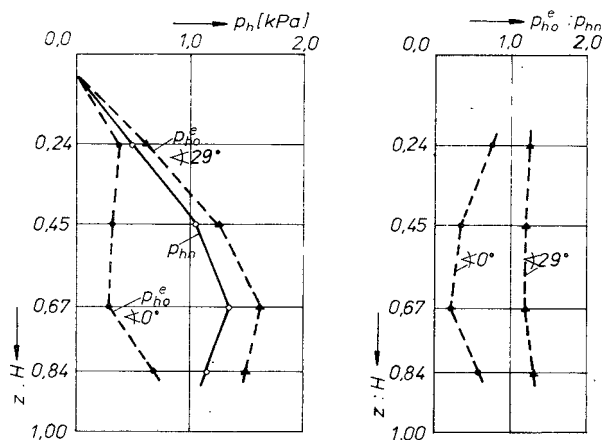
Fig.5.13. Sugar horizontal pressures in a 1040 mm model of a silo during discharging through the outlet gate eccentric to the axis of the chamber, $e = 0.19$ D



Rys.5.14. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu $\varnothing$ 1040 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,29$ D względem osi komory

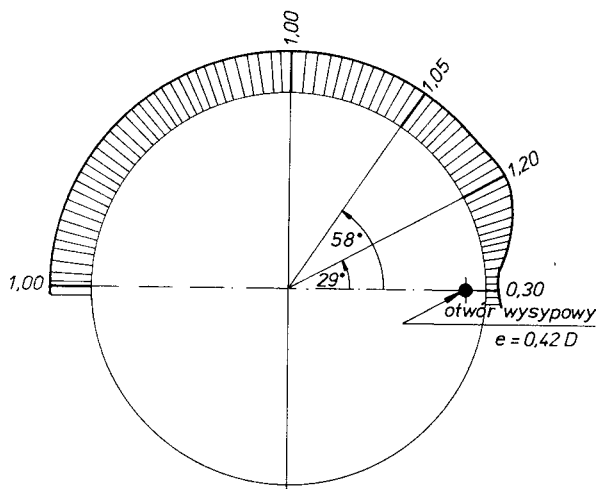
Fig.5.14. Sugar horizontal pressures in a $\varnothing$ 1040 mm model of a silo during discharging through the outlet gate eccentric to the axis of the chamber, $e = 0.29$ D

Liczbowe wartości ilorazów naporów napełniania i opróżniania wyznaczone dla różnych mimośrodków opróżniania modelu $\varnothing$ 740 mm zestawiono w tab.5.3.



Rys.5.15. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu $\varnothing$ 1040 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany na mimośrodku $e = 0,42 D$ (otwór przy ścianie komory)

Fig.5.15. Sugar horizontal pressures in a $\varnothing$ 1040 mm model of silo during discharging through the outlet gate eccentric to the axis of the chamber, $e = 0.42 D$ (outlet gate at the wall)



Rys.5.16. Rozkład naporu poziomego cukru w przekroju poziomym modelu silosu $\varnothing$ 1040 mm w trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie komory (poziom $z : H = 0,45$, na wykresie podano wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania)

Fig.5.16. Sugar horizontal pressure distribution across the transverse section of a $\varnothing$ 1040 mm model of a silo during discharging through the outlet gate located at the wall of the chamber (level $z : H = 0.45$, in the diagram the values of filling-to-discharging pressures ratio are given)

Próba optymalizacji procesu opróżniania w modelach o średnicach 740 mm i 1040 mm potwierdziła prawidłowość zasad ustalonych dla modelu 515 mm.

Pomiary naporu cukru w modelu o średnicy 1040 mm wykonano w trakcie opróżniania jego komory przez wysypowe otwory usytuowane na mimoszrodach $e = 0,19 D$, $e = 0,24 D$ i $e = 0,42 D$ względem osi komory.

Wykresy naporu poziomego cukru przedstawiono na rys.5.13-5.16. W czasie opróżniania modelu przez otwór wysypowy usytuowany na mimoszrodzie $e = 0,19 D$ wystąpił nieznaczny wzrost wartości poziomego naporu (w porównaniu do opróżniania symetrycznego). Wartości współczynników zmiany naporu (rys.5.13) wynoszą 1,02-1.14.

Dalsze zwiększenie mimosrodu otworu wysypowego ($e = 0,29 D$, rys. 5.14) powoduje wzrost nierównomierności rozkładu naporu poziomego cukru. Wartości współczynników zmiany naporu wynoszą od 0,73 do 1,20.

T a b e l a 5.4

Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania obliczone dla niesymetrycznie opróżnianego modelu $\varnothing 1040$ mm
(materiał sypki: cukier)

Poziom z : H	Wartości ilorazu $p_{ho}^e : p_{hn}$			
	$e = 0,19 D$	$e = 0,29 D$	$e = 0,42 D$	
			przekrój naprzeciw otworu wy- sypowego $\angle 0^\circ$	przekrój boczny $\angle 29^\circ$
0,24	1,09	1,20	0,77	1,25
0,45	1,06	1,07	0,30	1,20
0,67	1,02	0,73	0,22	1,20
0,84	1,14	1,05	0,59	1,30

W trakcie opróżniania przez otwór skrajny usytuowany na mimoszrodzie $e = 0,42 D$ (rys.5.15) powstaje najbardziej niekorzystny rozkład naporu poziomego. Wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania wynoszą od 0,22 do 1,30. Również podobnie jak w poprzednich modelach otrzymano charakterystyczny wykres naporu w przekroju poziomym komory (rys.5.16).

Wartości ilorazów naporów opróżniania i napełniania obliczone dla różnych mimosrodów opróżniania zestawiono w tab.5.4.

5.3.4. Wnioski

Badania dodatkowe wykazały, że wartości i rozkład naporu poziomego zależą od rodzaju materiału sypkiego oraz smukłości komory silosu.

Podczas wypełnienia modeli silosów pszenicę w badanym przekroju pionowym komory usytuowanym bezpośrednio po stronie otworu wysypowego ($\alpha 0^\circ$ poziom $z : H = 0,24$) wystąpił wzrost wartości naporu od 87 do 131%. Podczas badań cukru czujniki usytuowane w tym samym miejscu zarejestrowały spadek naporu w granicach od 15 do 23%. Zrealizowane pomiary potwierdziły również występowanie podczas opróżniania niesymetrycznego dużej nierównomierności rozkładu poziomego naporu na ścianie po stronie wpływu. Na podstawie wyników badań (przedstawionych np. w tab. 5.1) można stwierdzić, że nierównomierność rozkładu naporu poziomego jest największa w silosach o mniejszej smukłości.

5.4. Analiza wyników wybranych badań eksperymentalnych

5.4.1. Zestawienie badań

Pomiary naporu materiału sypkiego rozpoczęto ponad 40 lat temu w Baku [112]. Badania te wykonano w zblokowanych silosach elewatora zbożowego. Materiałem wypełniającym badaną komorę była pszenica. Pomiary zarówno w komorze opróżnianej symetrycznie, jak i niesymetrycznie nie wykazały istotnych różnic między oboma sposobami opróżniania. W obydwu przypadkach opróżniania wystąpiła znaczna nierównomierność rozkładu naporu poziomego pszenicy na całej powierzchni ściany. Wyniki tych badań stały się podstawą do przyjęcia w radzieckiej instrukcji do projektowania silosów żelbetowych jednakowych schematów obciążeń opróżniania symetrycznego i niesymetrycznego w komorach o średnicach do 12 m.

W 1964 roku badania Piepera [121] wykonane również na obiekcie w skali naturalnej z komorą wypełnianą jęczmieniem wykazały, że po stronie otworu wysypowego następuje spadek wartości naporu w momencie rozpoczęcia opróżniania niesymetrycznego. Wyniki tych pomiarów przyjęto do opracowanej pod kierunkiem Piepera zachodnoniemieckiej normy DIN-1055.

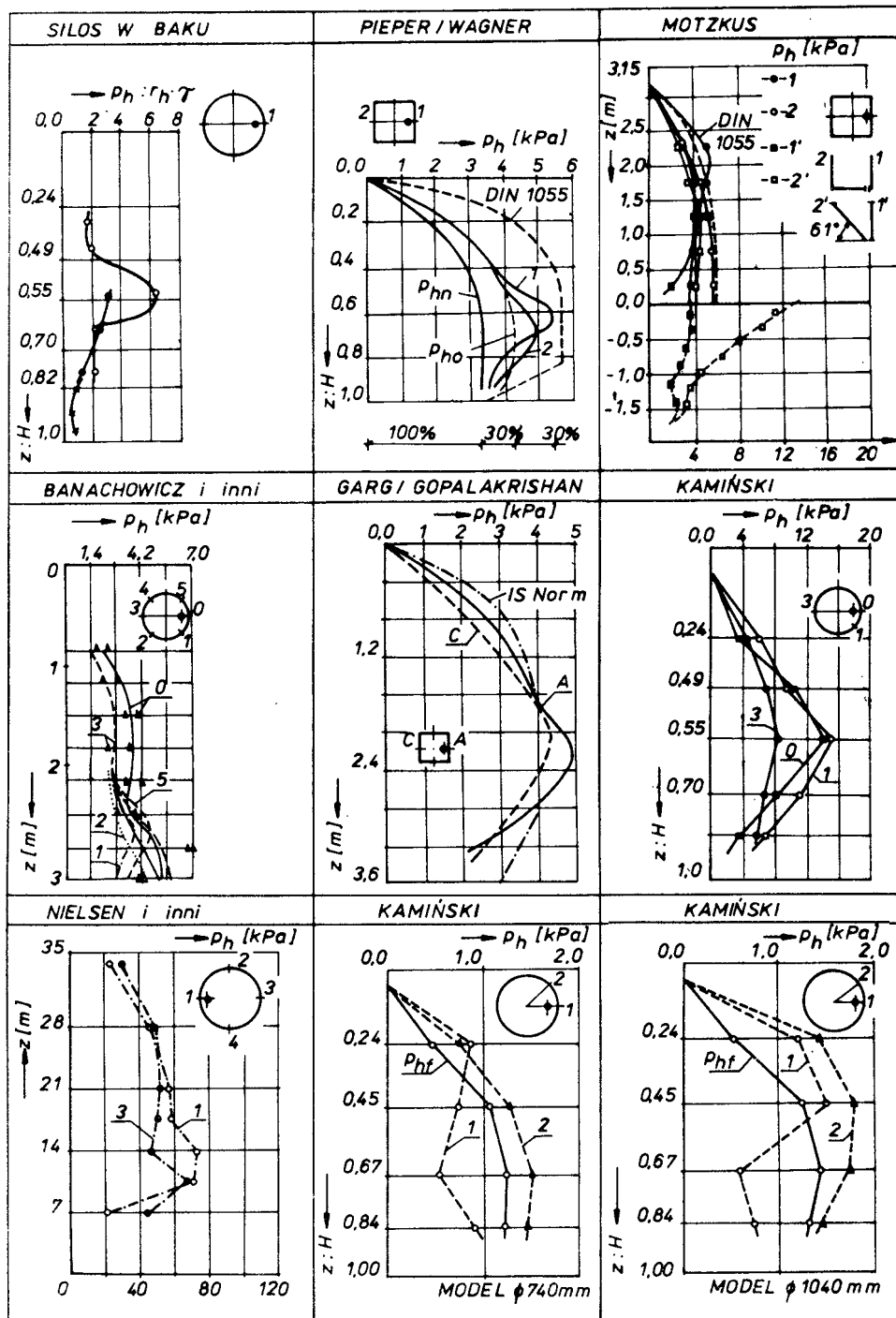
Różnice między wynikiem obydwu opisanych badań stały się przyczyną podjęcia tego tematu przez innych autorów, którzy swoje pomiary zrealizowali na obiektach w skali naturalnej lub na modelach silosów o różnej wielkości. Zestawienie wybranych dotychczasowych badań zamieszczono w tab. 5.5. Badania te obejmowały zarówno organiczne materiały sypkie (pszenica, jęczmień, ryż, owies i cukier), jak również nieorganiczne (piasek i węgiel).

T a b e l a 5.5

Zestawienie badań eksperymentalnych silosów
z niesymetrycznym opróżnianiem

Materiał sypki	Autor	Rok	Geometria komory		Materiał ścian komory	Kształt dna	
			Przekrój D lub a x b (m)	Wysokość H (m)		lej	dno płaskie
Pszenica	Badania w Baku wg [61]	1938 39	Ø 7,0	28,20	beton	x	
	Banachowicz i in. [4]	1973	Ø 1,25	4,78	beton	x	
	Motzkus [94]	1973	1,0x1,0	6,50	metal	x	x
	Garg Gopalakrishnan [37]	1974	0,7x0,7	3,60	metal		x
	Kamiński [61]	1977	Ø 1,25	4,27	beton		x
	Nielsen [107]	1980	Ø 7,0	46,0	beton	x	
	Kamiński wg rozdz. 5.3	1982	Ø 0,515 Ø 0,74 Ø 1,04	1,015 1,015 1,015	metal metal metal		x x x
	Kamiński, Zubrzycki [70]	1983	Ø 9,0	30,0	beton	x	
Jęczmień	Pieper i in. [121]	1964	3,92x3,92	65,0	beton		
	Klopsch [79]	1971	0,7x0,7	5,00	metal		x
	Nielsen [107]	1980	Ø 7,0	46,0	beton		x
Ryż	Gopala-krishnan [40]	1980	0,7x0,7	3,60	metal		x
Owies	Ravenet [137]	1976	0,3x0,3	1,98	plexi-glas		x
Cukier	Kamiński wg rozdz. 5.3	1982	Ø 0,515 Ø 0,74 Ø 1,04	1,015 1,015 1,015	metal metal metal		x x x
Piasek kwarcowy	Pieper Wagner [126]	1969	0,70x0,70	6,00	metal		x
	Motzkus [94]	1973	1,00x1,00	6,50	metal	x	
	Frese [34]	1977	Ø 0,78	6,00	plexi-glas	x	x
Węgiel	Blight, Midgley [6]	1980	Ø 20,0	41,20	beton	x	

x - oznacza badany kształt dna.



Rys.5.17. Zestawienie wyników badań naporu poziomego pszenicy w silosach opróżnianych niesymetrycznie

5.4.2. Wyniki badań

5.4.2.1. Badania naporu pszenicy

Wykresy naporu poziomego pszenicy z badań różnych autorów przedstawiono na rys.5.17.

Badania silosu w Baku [112] prowadzono w latach 1938 i 1939. Materiałem wypełniającym komorę silosu była pszenica o następujących cechach fizycznych:

- ciężar objętościowy $\gamma_0 = 7,86 \text{ kN/m}^3$
- kąt tarcia wewnętrznego od $24,7^\circ$ do $27,5^\circ$.

Pomiary wykonano w trakcie normalnej eksploatacji elewatora, wskutek czego w każdym cyklu badawczym opróżnianie silosu odbywało się po uprzednim różnym cyklu napełniania (napełnianie od nowa lub dopełnianie częściowo opróżnianego silosu) i różnym okresie magazynowania pszenicy. Niewątpliwie miało to istotny wpływ na różnice uzyskiwane w wynikach pomiarów.

W badaniach w Baku zastosowano dwa sposoby opróżniania (symetryczne i niesymetryczne). Opróżnianie niesymetryczne odbywało się przez otwór wysypowy usytuowany w leju silosu na mimośrodku wynoszącym 2,3 m względem osi komory. Podstawowy wniosek, który autorzy badań wyciągnęli z pomiarów zawierał stwierdzenie, że zarówno w trakcie opróżniania niesymetrycznego jak i symetrycznego występuje znaczna nierównomierność rozkładu naporu pszenicy. Analizując wyniki tych badań z perspektywy czasu można by dodać dodatkowe następujące stwierdzenia:

- wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania niesymetrycznego występuje prawie na całej powierzchni komory z wyjątkiem jej dolnej strefy po stronie usytuowania otworu wysypowego,
- maksymalne wartości wzrostu naporu poziomego występują w środkowej strefie komory po stronie otworu wysypowego wtedy, gdy komora była napełniona od początku (tzn. bez uprzednich częściowych opróżnień i dopełnień).

Podkreślić warto również znaczne różnice w wielkościach wzrostu naporu poziomego w różnych cyklach pomiarowych. Na przykład w badaniach prowadzonych w 1938 r. maksymalny współczynnik wzrostu naporu poziomego na ścianie po stronie otworu wysypowego wynosił 1,78 na wysokości 2,1 raza większej od średnicy komory. W 1939 roku natomiast współczynnik ten obliczony dla czujnika usytuowanego po stronie otworu wysypowego wynosił 2,31, a po stronie przeciwległej - 2,46. Wartości tych współczynników były zbliżone do wartości obliczanych dla opróżniania symetrycznego.

Banachowicz i inni [4] badań napór pszenicy, której pomierzone wartości cech fizycznych były następujące:

- ciężar objętościowy $\gamma_0 = 8,0 \text{ kN/m}^3$
- kąt tarcia wewnętrznego $\phi_u = 30^\circ$.

W wyniku tych badań stwierdzono występowanie wzrostu naporu poziomego na ścianach komory po obydwu stronach wypływu materiału sypkiego, przy czym maksymalny wzrost naporu poziomego po stronie wypływu materiału sypkiego pojawiał się w połowie wysokości komory, zaś po stronie przeciwnej maksymalny wzrost nastąpił w dolnej strefie silosu. Największe wartości wzrostu naporu poziomego wystąpiły w przekrojach pionowych odchylonych od otworu wysypowego o kąt 30° . Podobnie jak w badaniach w Baku, w najniższej strefie silosu po stronie wypływu materiału sypkiego występował po rozpoczęciu opróżniania spadek wartości naporu poziomego.

W badaniach Motzkusa [94] użyta została pszenica, której ciężar objętościowy wynosił $8,3\text{--}8,9 \text{ kN/m}^3$, kąt tarcia wewnętrznego - 35° , a kąt tarcia materiału sypkiego o ścianę - $18\text{--}25^\circ$. Z pomiarów wyciągnięto następujące wnioski:

a) wzrost naporu poziomego w wyższych strefach komory po stronie otworu wysypowego zależy od kształtu dna silosu; gdy dno jest płaskie, współczynnik wzrostu naporu wynosi 2,1, w silosie z lejem stożkowym - 1,65,

b) na ścianie komory usytuowanej po stronie przeciwnej w stosunku do otworu wysypowego pojawiają się niewielkie wzrosty naporu poziomego,

c) położenie maksimum wzrostu naporu poziomego po stronie otworu wysypowego jest różne w zależności od kształtu dna silosu; gdy dno jest płaskie wynosi $2a$ (a - wymiar przekroju poziomego komory kwadratowej), gdy lej jest stożkowy - ok. $3a$.

Garg i Gopalakrishnan [37] również stwierdzili występowanie wzrostu naporu poziomego pszenicy na ścianach komory po stronie wypływu. Z badań tych autorów wyciągnięto następujące wnioski:

a) współczynnik wzrostu naporu poziomego zależy od wartości mimośrodowo usytuowania otworu wysypowego i dla mimośrodów równych jednej czwartej wymiaru boku komory wynosi 1,50, a gdy otwór jest usytuowany bezpośrednio przy ścianie silosu - 1,60,

b) maksimum wzrostu naporu poziomego po stronie otworu wysypowego położone jest na wysokości $2,2a$ niezależnie od mimośrodowo usytuowania otworu wysypowego.

Nielsen [107] badając napór poziomy pszenicy w silosie w skali naturalnej uwzględnił nie tylko wpływ opróżniania niesymetrycznego, lecz także wpływy mimośrodków otworów, przez które napełniano komorę silosu.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów Nielsen stwierdził, że napełnianie niesymetryczne silosu powoduje wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania. Współczynnik maksymalnego wzrostu naporu na

ścianie po stronie wypływu wynosił 1,90, a miejsce maksymalnego wzrostu usytuowane było na wysokości około dwa razy większej niż średnica komory.

Kamiński [67] prowadził badanie naporu pszenicy na modelach silosów o różnej smukłości komór wyposażonych w płaskie dna. Z badań tych, przedstawionych dokładniej w p. 5.3, wyciągnięto następujące wnioski:

- a) na ścianie komory silosu po stronie wypływu pszenicy występuje znaczna nierównomierność rozkładu naporu poziomego,
- b) maksymalny wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania wynosi od 87 do 131%,
- c) miejsce występowania wartości maksymalnej zależy od smukłości komory silosu,
- d) po rozpoczęciu opróżniania w dolnej strefie silosu na ścianie usytuowanej bezpośrednio po stronie otworu wysypowego występuje spadek wartości naporu poziomego.

5.4.2.2. Badania naporu jęczmienia

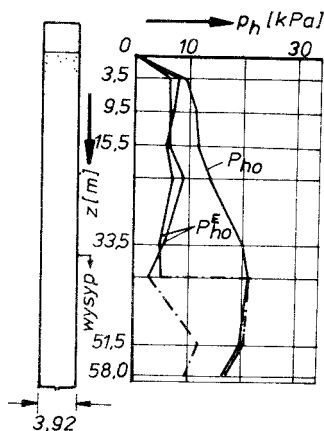
Na rysunku 5.18 przedstawiono wykresy naporu poziomego jęczmienia z badań różnych autorów w latach 1964-1980.

Pierwsze pomiary wykonał Pieper [121] na silosie w skali naturalnej z komorą o przekroju prostokątnym. Ciężar objętościowy jęczmienia wynosił $7,3 \text{ kN/m}^3$, kąt tarcia wewnętrznego $29-32^\circ$ oraz kąt tarcia o ścianę - $21-24^\circ$. Głównie pomiary prowadzono w trakcie opróżniania symetrycznego. Do opróżniania niesymetrycznego doszło dzięki przypadkowemu otworzeniu się jednego z otworów wykonanych w ścianie komory do zamocowania czujników. Wykonane w ten sposób pomiary wykazały, że po stronie otworu wysypowego następuje w trakcie opróżniania redukcja wartości naporu poziomego o ok. 23% na całej wysokości komory silosu. Ponieważ badania innych autorów nie potwierdzają pomiarów Piepera, nasuwa się stąd przypuszczenie, że w pomiarach tych z powodu zbyt dużych odległości między czujnikami nie uchwycono charakterystycznego dla opróżniania niesymetrycznego miejscowego wzrostu wartości naporu.

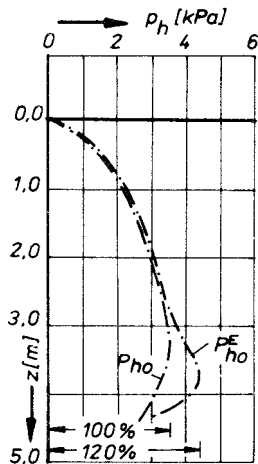
Klopsch [79] wykonał pomiary naporu jęczmienia w stalowych modelach silosów, których komory wykonano z blachy falistej oraz z blachy o profilu trapezowym. Na podstawie wyników badań Klopsch wykazał, że wzrost naporu poziomego jęczmienia na ścianie komory po stronie wypływu zależy od mimośrodowości usytuowania otworu wysypowego i wynosi do 24% (blacha falista) lub do 21% (blacha trapezowa).

Napór jęczmienia w silosie w skali naturalnej badał również Nielsen [107]. W wyniku tych badań stwierdzono, że wzrost naporu poziomego jęczmienia w trakcie opróżniania niesymetrycznego komory silosu jest znacznie większy aniżeli pszenicy. Wartości naporu poziomego jęczmienia

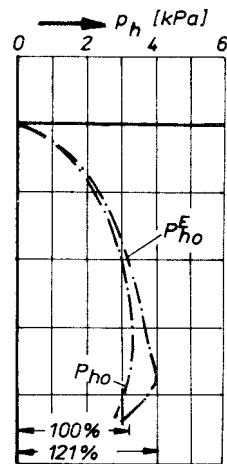
PIEPER i inni



KLOPSCH

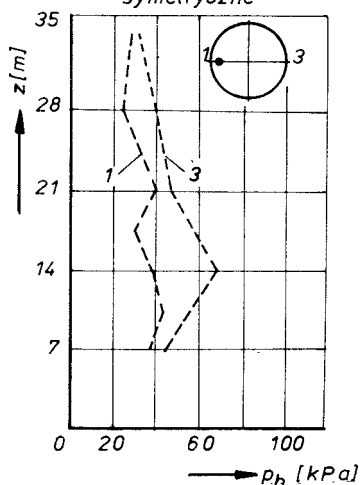


a. Blacha falista

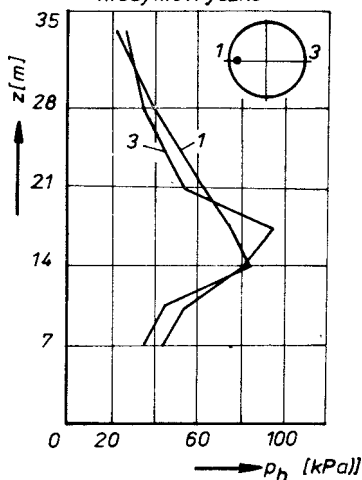


b. Blacha gięta (trapez)

NIELSEN i inni
a. napełnianie silosu
symetryczne



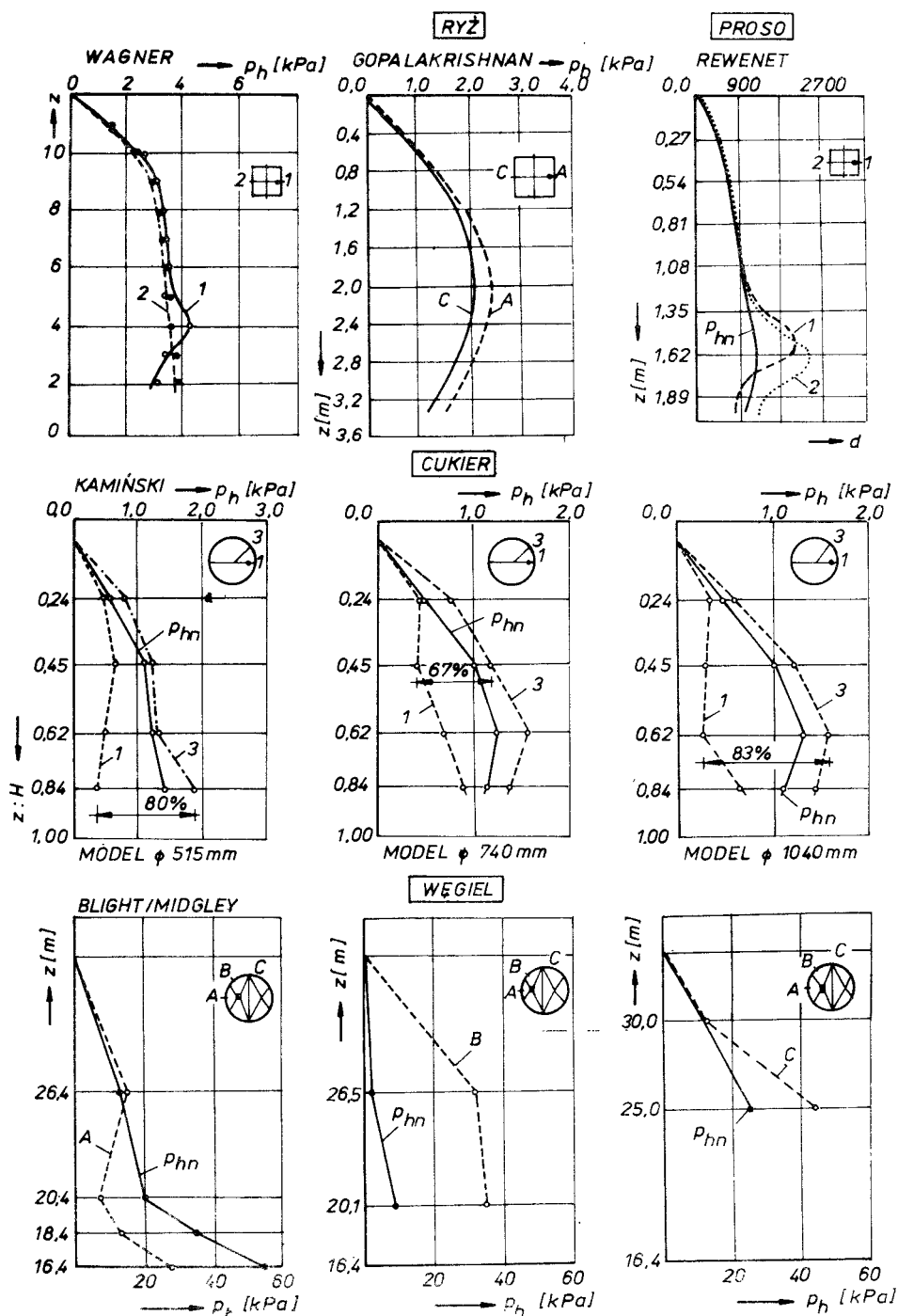
b. napełnianie silosu
niesymetryczne



Rys.5.18. Zestawienie wyników badań naporu poziomego jęczmienia w silosach opróżnianych symetrycznie

Fig.5.18. Comparison of the results for barley horizontal pressures in symmetrically discharged silos

w trakcie opróżniania silosu były 3,1 raza większe od wartości naporu wyznaczonego ze wzorów Janssena. Wartości wzrostu naporu poziomego zależały m.in. od sposobu napełniania komory. Napełnianie niesymetryczne prowadziło do większego wzrostu napru poziomego w trakcie opróżniania silosu, a także do zmiany rozkładu tego naporu.



Rys.5.19. Zestawienie wyników badań naporu poziomego ryżu, prosa, cukru i węgla w silosach opróżnianych niesymetrycznie
 Fig.5.19. Comparison of the results for rice, millet, sugar, and coal in no-symmetrically discharged silos

5.4.2.3. Badania naporu innych gatunków zbóż

Przedmiotem badań były także ryż i proso (rys.5.19). Pomiary naporu ryżu przeprowadził Gopalakrishnan [40]. Na podstawie wyników pomiarów sformułowano następujące wnioski:

1. Wzrost naporu poziomego ryżu w trakcie opróżniania niesymetrycznego jest znacznie mniejszy aniżeli pszenicy. Współczynniki wzrostu tego naporu wynosiły od 1,2 do 1,3 w zależności od wartości mimośrodowego usytuowania otworu wysypowego.

2. Miejsce maksymalnego wzrostu naporu poziomego na ścianie po stronie wypływu ryżu usytuowane jest na wysokości od 1,4 D do 2,0 D i zależy również od wartości mimośrodowego usytuowania otworu wysypowego (D - średnica komory).

Badania naporu proso prowadził Rawenet [137]. Pomiary wykonał na małym modelu silosu wykonanym z pleksiglasu i sformułował następujące wnioski:

1. Na ścianie po stronie otworu wysypowego w dolnej części silosu w trakcie opróżniania następuje spadek wartości naporu poziomego.

2. Na wysokości około 1,5a (a - wymiar boku kwadratowej komory) zarówno na ścianie po stronie otworu wysypowego, jak i po jego przeciwnej stronie występuje maksymalny wzrost wartości naporu poziomego.

3. Na ścianach w górnej części silosu nie występują żadne zmiany wartości naporu poziomego.

5.4.2.4. Badania naporu cukru

Badania własne naporu cukru przedstawiono w p. 5.3.

Na rysunku 5.19 zamieszczono wykresy naporu cukru w trakcie opróżniania trzech modeli silosów przez otwory usytuowane przy ścianach komór. Na wykresach tych opisano również maksymalne procentowe różnice w wartościach naporu poziomego, pomierzonych w dwóch charakterystycznych przekrojach silosów.

5.4.2.5. Badania naporu sypkich materiałów nieorganicznych

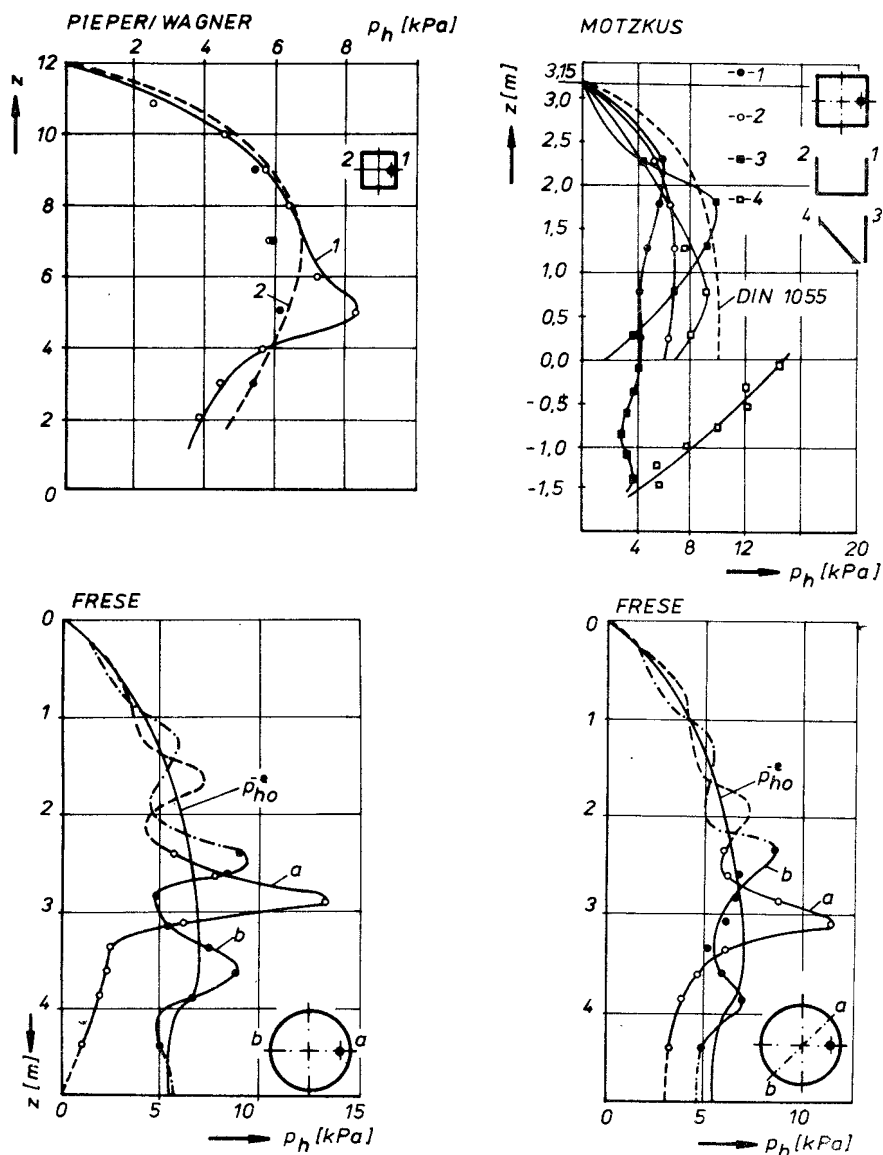
Blight i Midgley [6] badali rozkład naporu poziomego węgla w silosie w skali naturalnej. Pomierzone wartości fizyczne węgla wynosiły:

- ciężar objętościowy: $7,45-9,45 \text{ kN/m}^3$,
- kąt tarcia wewnętrznego: $39-43^\circ$.

Z wyników badań przedstawionych na rys.5.19 można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Rozkład naporu poziomego węgla zarówno w trakcie napełniania, jak i opróżniania, charakteryzuje się dużą nierównomiernością,

2. W przekroju pionowym po stronie otworu wysypowego w dolnej strefie zanotowano spadek wartości naporu węgla w trakcie opróżniania, w górnej zaś strefie (poz.26,4 m) wystąpił niewielki wzrost wartości naporu,



Rys.5.20. Zestawienie wyników badań naporu poziomego piasku w silosach opróżnianych niesymetrycznie
Fig.5.20. Comparison of the results for sand horizontal pressures in non-symmetrically discharged silos

3. W pozostałych badanych przekrojach w trakcie opróżniania silosu zanotowano wzrost wartości naporu wzdłuż całej wysokości komory.

Pieper i Wagner [126] wykonali badania naporu piasku w kwadratowym modelu silosu. Piasek miał następujące wartości cech fizycznych:

- ciężar objętościowy: $16,5 \text{ kN/m}^3$,
- kąt tarcia wewnętrznego: 36° .

Na podstawie uzyskanych wyników badań (rys.5.20) stwierdzono, że wzrost wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania silosu występuje przede wszystkim na ścianie po stronie wypływu piasku. Wzrost wynosił od 60 do 70% w porównaniu do naporu napełniania.

Motzkus [94] badania wykonał również z użyciem kwadratowego modelu silosu wypełnionego piaskiem kwarcowym, którego pomierzone wartości cech fizycznych wynosiły:

- ciężar objętościowy: $15,7\text{--}16,5 \text{ kN/m}^3$,
- kąt tarcia wewnętrznego: $33\text{--}41^\circ$.

Podane granice wartości cech dotyczą luźnego i zagęszczonego stanu materiału sypkiego.

Na podstawie badań wykazał Motzkus, że kształt dna silosu ma istotny wpływ na wartości naporu poziomego powstającego w trakcie opróżniania niesymetrycznego (rys.5.20). W silosie wyposażonym w lej ostrosłupowy pomierzono znacznie większe wartości naporu poziomego piasku aniżeli w silosie z dnem płaskim. W obydwu przypadkach jednak potwierdzony został charakterystyczny rozkład naporu poziomego na ścianie po stronie wypływu. W trakcie opróżniania w dolnej strefie silosu wystąpił spadek wartości naporu, w strefie górnej zaś wartości naporu zwiększyły się.

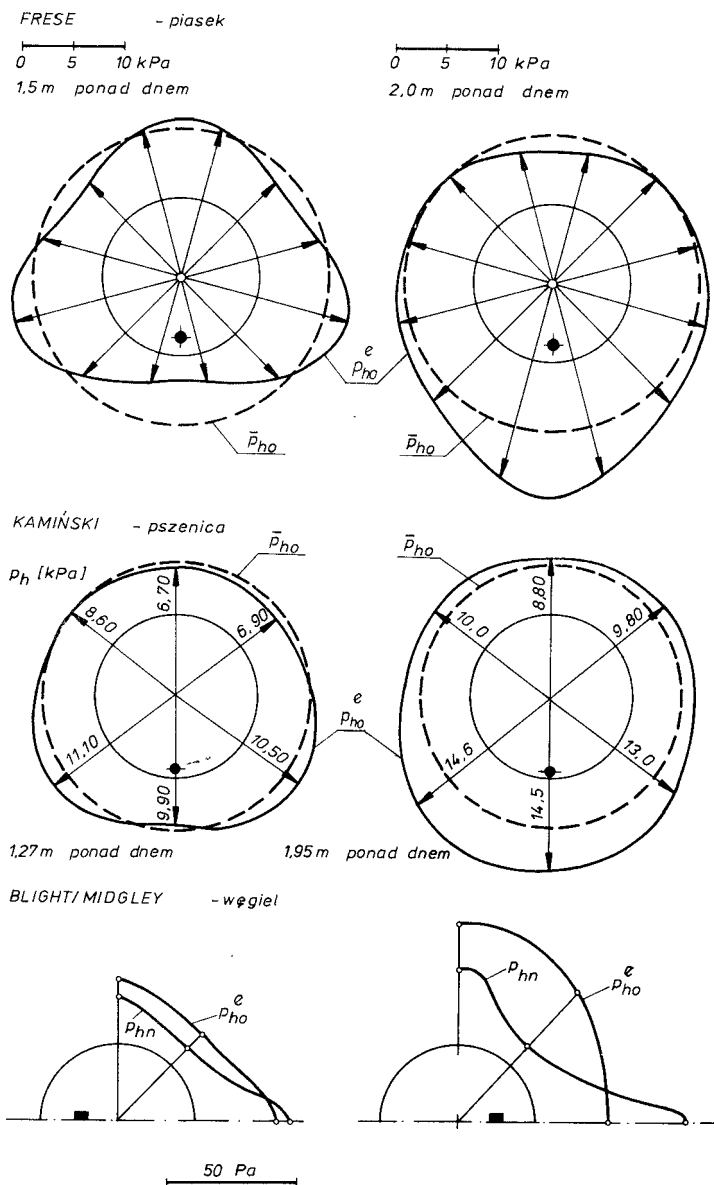
Frese [34] badał rozkład i wartości naporu piasku w modelu cylindrycznego silosu. Dla piasku kwarcowego zastosowanego do badań podaje Frese następujące wartości cech:

- ciężar objętościowy: $14,1\text{--}16,51 \text{ kN/m}^3$,
- kąt tarcia wewnętrznego: $27,6\text{--}43,8^\circ$ (przepływ stacjonarny)
 $51,8\text{--}57,8^\circ$ (początek płynięcia).

Wyniki pomiarów wykazały, że wartości naporu poziomego w trakcie opróżniania niesymetrycznego zmieniają się pulsacyjnie w stosunku do pewnej wartości średniej naporu (rys.5.20). Maksymalny wzrost wartości naporu opróżniania wystąpił na ścianie po stronie wypływu piasku i wynosił od 100 do 130% w stosunku do naporu napełniania.

5.4.3. Jakościowa i ilościowa ocena wyników analizowanych badań

Większość przedstawionych wyników badań eksperymentalnych wykazała, że w trakcie opróżniania niesymetrycznego komór silosów zasadnicze zmiany wartości i rozkładu naporu poziomego występują na ścianie po stronie otworu wysypowego. Kilku tylko autorów podało rozkład naporu w przekroju poziomym komory silosu. Przykłady te, przedstawione na rys. 5.21, wskazu-



Rys.5.21. Rozkład naporu poziomego materiału sypkiego według badań różnych autorów

Fig.5.21. Horizontal pressure distribution of a bulk solid according to the studies by different authors

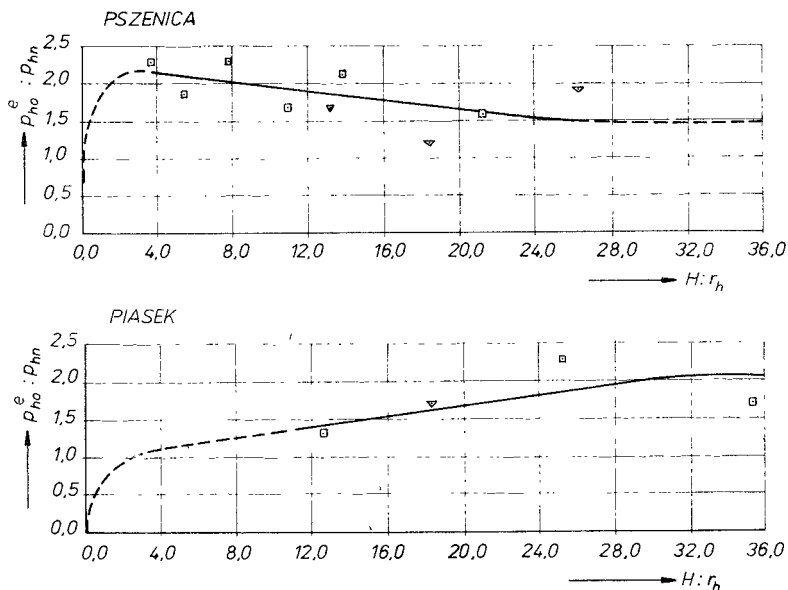
ją na pewne charakterystyczne zmiany naporu poziomego w stosunku napełnienia lub opróżniania symetrycznego.

T a b e l a 5.6

Wartości i miejsce występowania maksymalnych zmian naporu poziomego
materiału sypkiego w trakcie opróżniania niesymetrycznego silosów
o różnej smukłości komór

Materiał sypki	Autor badań lub miejscowość	Smukłość wypełnienia komory silosu $H_n : r_h$	Dane dla ściany komory po stronie wysypu	
			max ($p_{ho}:p_{hn}$)	Wysokość występowania maksymalnego wzrostu do poziomu dna
Pszenica	Baku [112]	16,1	2,30	8,4 r_h
	Motzkus [94]	18,4 (lej) 12,6 (dno p)	1,20 2,10	12 r_h 8 r_h
	Banachowicz i in. [4]	12,3	1,70	5,5 r_h
	Garg, Gopalakrishnan [37]	21,2	1,60	8 r_h
	Nielsen i in. [107]	26,3	1,90	8 r_h
	Kamiński [61] i wg rozdz. 5.3	13,8 7,9 5,4 3,8	2,31 2,3 1,87 2,31	6,2 r_h 6,0 r_h 4,1 r_h 2,9 r_h
	Kamiński, Zubrzycki [70]	12,9 6,4	1,64 3,64	7,1 r_h 4,9 r_h
Jęczmień	Pieper i in. [121]	40,2	0,77	
	Klopsch [79]	29,4	1,77	7,9 r_h
	Nielsen i in. [107]	26,3	1,55	8 r_h
Ryż	Gopalakrishnan [40]	21,2	1,2-1,3	5,8-8,3 r_h
Proso	Ravenet [137]	25,0	1,7	5,8 r_h
Cukier	Kamiński wg rozdz. 5.3	7,9	0,85	5,9 r_h
		5,4	0,91	4,1 r_h
		3,8	0,77	2,9 r_h
Węgiel	Blight, Midgley [6]		1,1	3,6 r_h
Piasek	Pieper, Wagner [126]	35,3	1,6-1,7	13 r_h
	Motzkus [94]	18,4 (lej) 12,6 (dno p)	1,7 1,3	13 r_h 8,8 r_h
	Frese [34]	25,3	2,0-2,3	(7,8-12,6) r_h

W dolnych strefach badanych silosów po stronie wypływu materiału sypkiego występuje spadek wartości naporu poziomego. W wyższych strefach komory (z wyjątkiem silosów na węgiel i cukier) występują zwiększenia wartości naporu. Dla wszystkich materiałów sypkich w przekrojach bocznych usytuowanych w niewielkiej odległości od otworu wysypowego notowano zwiększone wartości naporu poziomego.

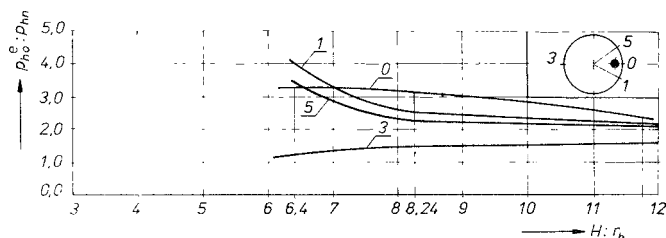


Rys.5.22. Wykresy zmiany maksymalnej wartości naporu poziomego pszenicy i piasku na ścianie silosu po stronie wypływu ($\nless 0^\circ$) w zależności od smukłości komory
 Fig.5.22. Changes in the maximum values of wheat and sand horizontal pressures on the wall of a silo measured on the inlet side ($\nless 0^\circ$) as a function of the chamber slenderness ratio

W tabeli 5.6 zestawiono ilościowe wyniki analizowanych pomiarów. Tabela ta zawiera dane dotyczące rodzaju badanego materiału sypkiego, smukłości wypełnienia komory silosu materiałem sypkim oraz wartości wzrostu i położenia maksymalnego naporu poziomego na powierzchni ściany usytuowanej po stronie wysypu materiału sypkiego.

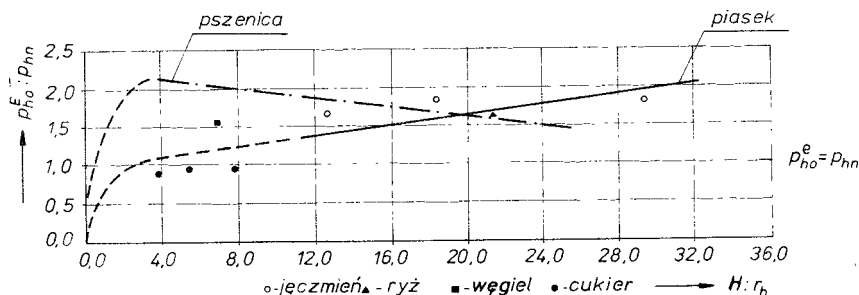
Na podstawie danych liczbowych wyników badań zestawionych w tab.5.6 przedstawiono na rys. 5.22 wykresy obrazujące zmianę wartości naporu poziomego pszenicy i piasku na ścianie silosu po stronie wypływu w zależności od smukłości komory. Obydwa wykresy podkreślają istniejące różnice oddziaływań dwóch różnych materiałów sypkich. W silosach o małej smukłości względny wzrost wartości naporu pszenicy w trakcie opróżniania

(odniesiony do naporu napełniania) jest wyższy aniżeli w silosach o dużej smukłości. Odwrotnie zależność ta wygląda w silosach wypełnionych piaskiem.



Rys. 5.23. Wykres wpływu poziomu napełnienia komory na wartość ilorazu naporów opróżniania i napełniania w silosie opróżnianym niesymetrycznie (badania własne)

Fig. 5.23. The effect of the level of chamber filling on the value of discharging-to-filling pressures ratio for a non-symmetrically discharged silo (author's own studies)



Rys. 5.24. Zestawienie wykresów wpływu smukłości komory silosu na wzrost naporu poziomego na ścianie po stronie wypływu, z uwzględnieniem oddziaływań jęczmienia, ryżu, węgla i cukru
Fig. 5.24. Comparison of the effects of chamber slenderness ratio on the increase of the horizontal pressure on the outlet side taking into account the effects of a bulk solid stored, barley, rice, coal, and sugar

Autor znacznie wcześniej w ramach pracy [61] wykazał podobną do przedstawionej na rys. 5.22 zmianę ilorazu naporów opróżniania i napełniania w zależności od smukłości wypełnienia pszenicą modelu silosu cylindrycznego. Wykres z tych badań przedstawiono na rys. 5.23.

Występowanie większych wartości ilorazu naporów opróżniania i napełniania w komorze o mniejszej smukłości potwierdził również Rybiński [145].

Ponieważ badania naporu pozostałych materiałów sypkich wykonano w ilości niewystarczającej, by określić dla nich zależność wzrostu naporu opróżniania od smukłości silosu, na rys. 5.24 naniesiono wyniki tych badań na tle krzywych wyznaczonych dla pszenicy i piasku. Z rysunku tego

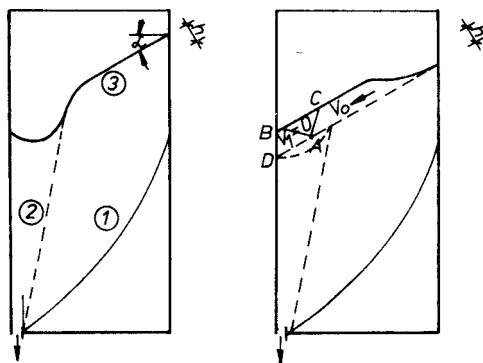
wynika, że np. zależność zmiany wzrostu naporu cukru może być zbliżona do krzywej sporządzonej dla piasku.

Podobnie do piasku może też zmieniać swoje oddziaływanie jęczmień. Z uwagi na zbyt małą ilość badań węgla i ryżu trudno byłoby ustalić rzeczywisty przebieg zależności zmiany wartości wzrostu naporu od smukłości silosu.

5.5. Efekt warstwowego spływu zboża

Autor na podstawie badań [68] przedstawił model przepływu materiału sypkiego w silosie w trakcie opróżniania niesymetrycznego. Model w założeniu swym opiera się na hipotezie dynamicznych sklepień wysuniętej przez Platonowa i Banita [31].

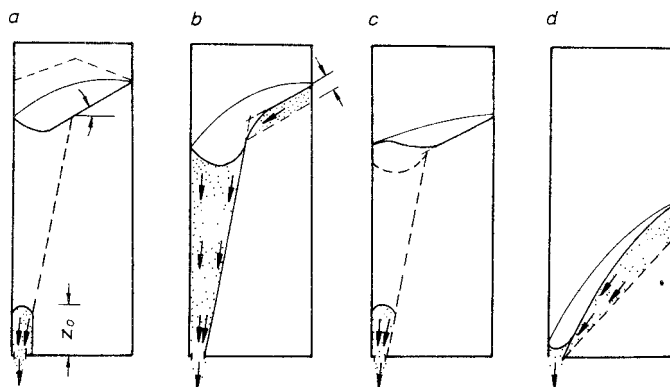
Prowadzone w trakcie badań obserwacje ruchu pszenicy pozwoliły wykazać, że materiał sypki spływa w kierunku otworu wysypowego ruchem pulsacyjnym, poczynając od jego warstw powierzchniowych.



Rys.5.25. Schemat warstwowego spływu materiału sypkiego
Fig.5.25. Laminar flow of a bulk solid

Zaobserwowane zjawisko warstwowego ruchu materiału sypkiego w silosie opróżnianym niesymetrycznie wyjaśnić można powstawaniem dynamicznych sklepień bezpośrednio nad otworem wysypowym. Cyklicznie załamujące się sklepienie powoduje w obrębie rdzenia przepływu gwałtowne obniżenie się poziomu ziarna w górnej strefie silosu. Powoduje to ruch wierzchniej warstwy materiału sypkiego w kierunku otworu wysypowego (rys. 5.25). Zjawisko przesuwania się górnej warstwy materiału można porównać do ruchu lawiny warstwej, której spiętrzenie następuje na nieruchomym odcinku ściany komory BD.

Na podstawie badań stwierdzono, że ruch powierzchniowych warstw zboża rozpoczyna się po opróżnianiu około 1/18 pojemności modelu silosu, przy czym początkowo składowa pozioma wektora prędkości poruszającej



Rys.5.26. Schemat kolejnych etapów warstwowego spływu materiału sypkiego w trakcie niesymetrycznego opróżniania silosu
 Fig.5.26. Successive stages in the laminar flow of a bulk solid during a non-symmetric discharging

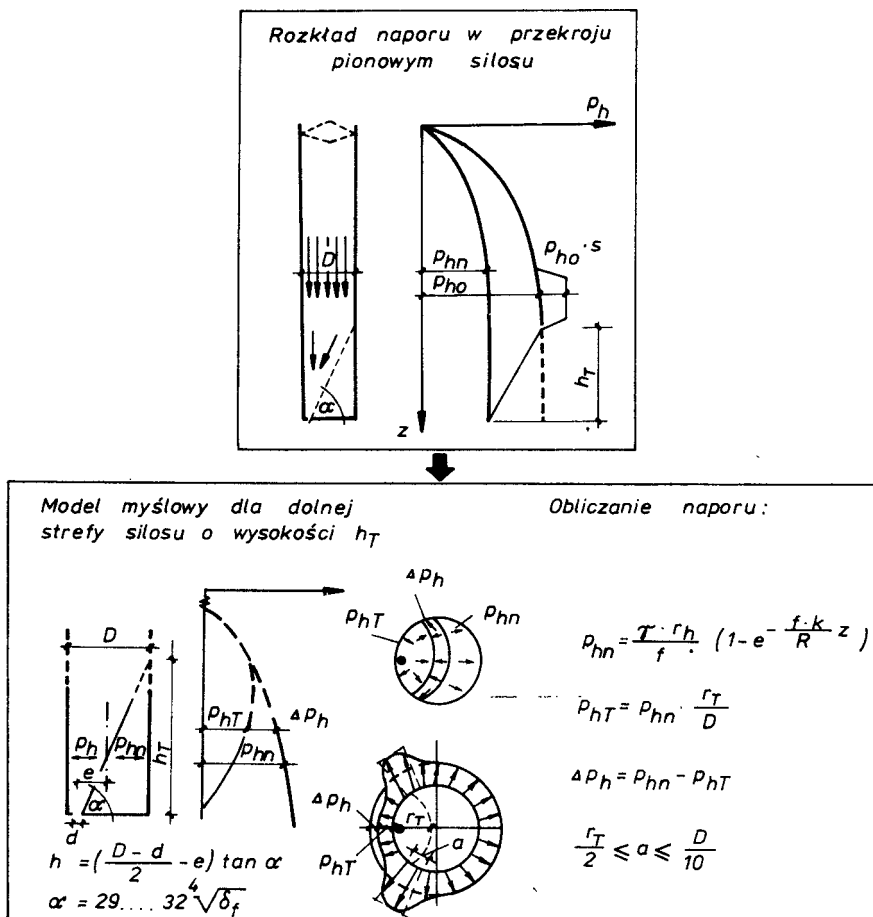
się warstwy ma wartość niewielką. Chwilę tę można uznać za moment załamania się pierwszego sklepienia nad otworem wysypowym. Wraz z obniżeniem się poziomu zasypania wzrasta ilość oraz składowa pozioma prędkości ziarna poruszającego się w kierunku ściany, osiągając maksymalne wartości w środkowej strefie silosu. Wprawdzie w niższych partiach silosu ilość poruszającego się w warstwie ziarna nie ulega zmianie, lecz w wyniku powiększenia się rdzenia wypływu strumień ziarna zmierza już bezpośrednio do otworu wysypowego (zwiększa się składowa pionowa wektora prędkości warstwy).

Na rysunku 5.26 przedstawiono interpretację własną kolejnych faz niesymetrycznego opróżniania silosu. Według tego rysunku w momencie otworzenia zasuwy otworu wysypowego zaczyna wysypywać się materiał sypki znajdujący się bezpośrednio nad otworem (rys.5.26a). Nad otworem wysypowym tworzy się sklepienie o wysokości z_0 . Następnie sklepienie załamuje się, w wyniku czego powstaje rdzeń ruchu sięgający górnej powierzchni ni materiału sypkiego. W rdzeniu ruchu następuje obniżenie się poziomu materiału (rys. 5.26b). Znajdujące się w nim ziarna szybko zwiększają prędkość i zwalniają miejsce dla zsuwającej się wierzchniej warstwy dotychczas nieruchomego materiału sypkiego. Ze względu na to, że warstwa ta ma większą objętość niż zwolnione dla niej miejsce, nie mieści się ona w całości w rdzeniu przepływu, lecz po zderzeniu ze ścianą na moment zatrzymuje się (rys.5.26c). Nagłe zatrzymanie się masy materiału wywołuje zwiększenie się wartości naporu. Po odbudowaniu następnego sklepienia cykl powtarza się tak długo, aż ziarna materiału sypkiego zaczną się poruszać po torach skierowanych bezpośrednio do otworu wysypowego (rys.5.26d). Wówczas już zjawiska zsypania się materiału sypkiego na ścianę silosu nie obserwuje się.

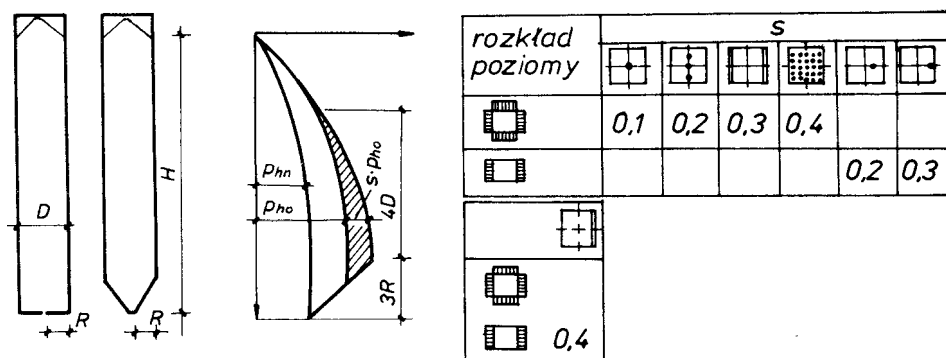
5.6. Propozycje ekwiwalentnych schematów obciążeń

5.6.1. Propozycja Piepera [128]

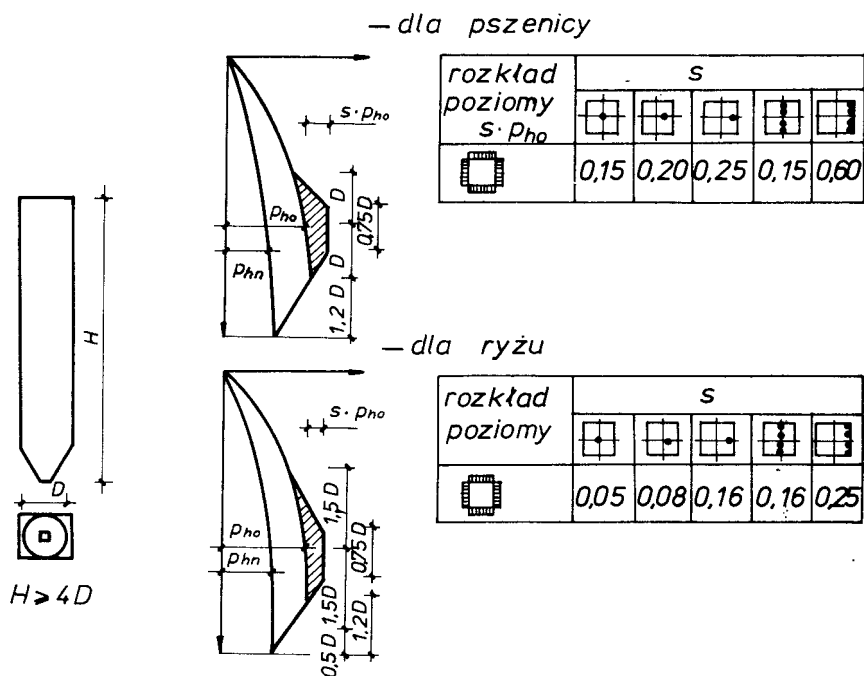
Pieper podał dwie propozycje uwzględnienia wpływu opróżniania niesymetrycznego. Pierwsza z nich została uwzględniona w drugim wydaniu projektu nowej normy DIN-1055 i opiera się przede wszystkim na założeniu, że wartości i rozkład naporu poziomego na ścianach komory silosu opróżnianego niesymetrycznie zależą od wysokości strefy martwej materiału sypkiego. Według tej propozycji napór w dolnej części komory rozkłada się nierównomiernie według schematu przedstawionego na rys. 5.27. W o-



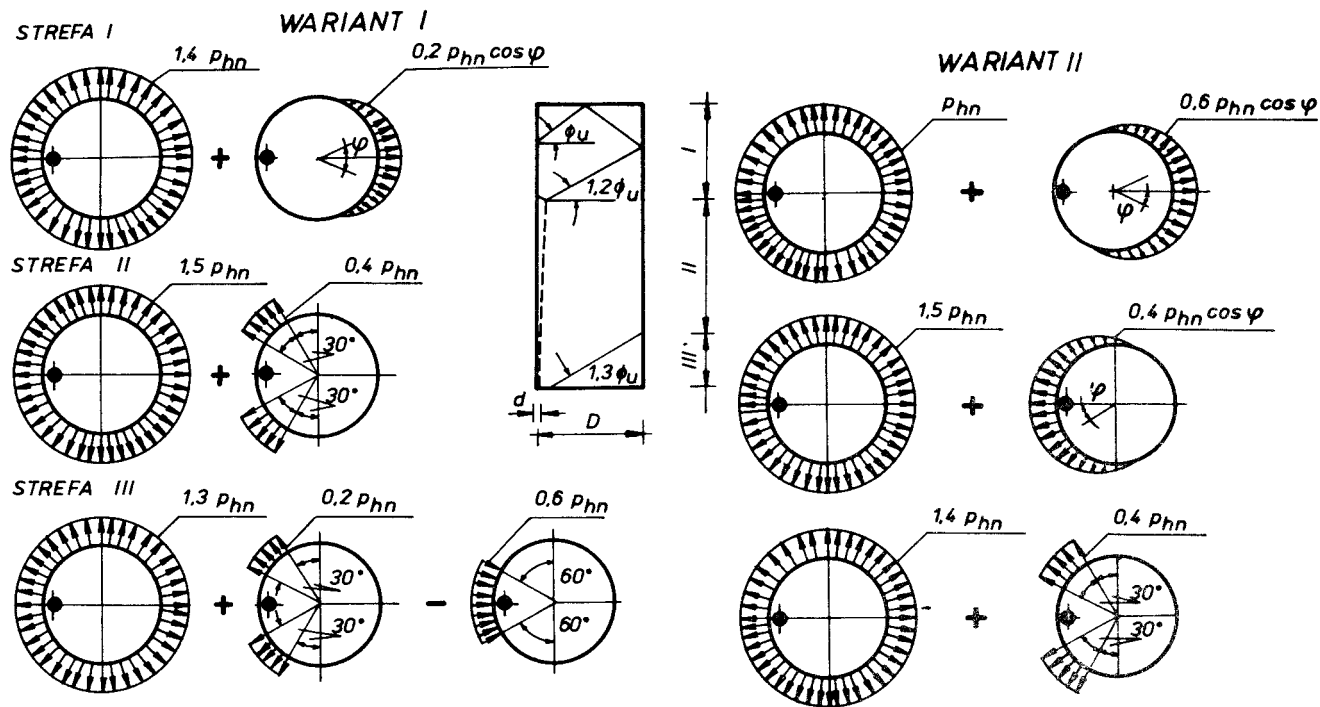
Rys.5.27. Ideowy schemat propozycji Piepera
Fig.5.27. Schematic diagram of Pieper's proposal



Rys.5.28. Schematy obciążeń ścian silosów opróżnianych niesymetrycznie (wg Piepera)
Fig.5.28. Loads acting on the walls of non-symmetrically discharge silos (according to Pieper)



Rys.5.29. Schematy obciążeń ścian silosów wypełnionych pszenicą lub ryżem (wg Gopalakrishnana)
Fig.5.29. Loads acting on the walls of wheat or rice filled silos (according to Gopalakrishnan)



Rys.5.31. Ekwiwalentne schematy obciążeń silosów na zboże opróżnianych niesymetrycznie według propozycji autora
 Fig.5.31. Equivalent diagrams of loads acting on non-symmetrically discharged silos for corn storing (according to the author's suggestion)

5.6.2. Propozycja Gopalakrishnana [40]

Gopalakrishnan uwzględnia w swej propozycji specyfikę materiału sypkiego oraz ogranicza jej stosowanie dla smukłości silosu $H : D \geq 4$.

Rozkład naporu pionowego w przekroju pionowym przyjmuje on podobny do propozycji Piepera (rys.5.29).

5.6.3. Propozycja Peschla [118]

Propozycja Peschla opiera się na założeniu, że w wyniku opróżniania niesymetrycznego silosu, w jego komorze zachodzi przepływ rdzeniowy nad otworem wysypowym (rys.5.30). W obrębie rdzenia przepływu występuje spadek wartości naporu poziomego. Na pozostałej powierzchni ścian wartości naporu opróżniania są równe wartościom naporu działającego po napełnieniu komory.

5.6.4. Propozycja autora

W wyniku badań prowadzonych w ramach pracy [61] podana została propozycja dwóch wariantów ekwiwalentnych schematów naporu pszenicy w silosach opróżnianych niesymetrycznie o smukłości komór $H : D \cong 2,0$. Według tej propozycji komora silosu dzielona jest na trzy strefy (rys.5.31), których wysokości oblicza się z następujących wzorów:

$$H_I = (D - 0,5 d) \operatorname{tg} 1,2 \phi_u + 0,5 D \operatorname{tg} \phi_u,$$

$$H_{II} = H - 2 (D - 0,5 d) \operatorname{tg} 1,2 \phi_u,$$

$$H_{III} = (D - 0,5 d) \operatorname{tg} 1,3 \phi_u.$$

W obliczeniach silosu należy uwzględnić jeden z dwóch wariantów obciążeń, dający bardziej niekorzystne wartości sił wewnętrznych.

Druga propozycja oparta jest na wynikach badań przedstawionych w p. 5.3 i dotyczy przyjęcia naporu cukru, który wywołuje nieco inny rozkład naporu aniżeli pszenica.

Wartości naporu cukru na ścianie po stronie otworu wysypowego można wyznaczyć z następujących wzorów:

- dla mimośrodowo usytuowania otworu wysypowego $e \leq 0,3 D$:

$$p_{ho}^e = (1 + S_1) p_{ho}$$

- dla mimośrodowo usytuowania otworu wysypowego $e > 0,3 D$:

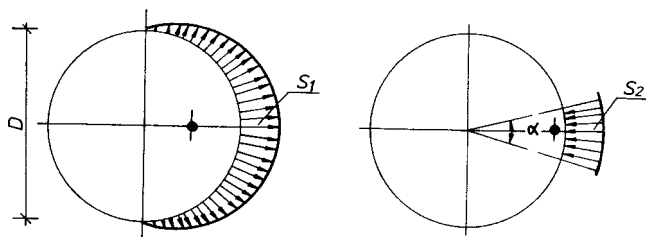
$$p_{ho}^e = (1 + S_1) p_{ho} - S_2 p_{hn}.$$

Wartości współczynników S_1 i S_2 zestawiono w tab.5.7, a rozkład dodatkowego obciążenia o intensywności $S_1 p_{ho}$ i $S_2 p_{hm}$ przedstawiono na rys. 5.32.

T a b e l a 5.7

Wartości współczynnika S_1 i S_2 oraz kąta α

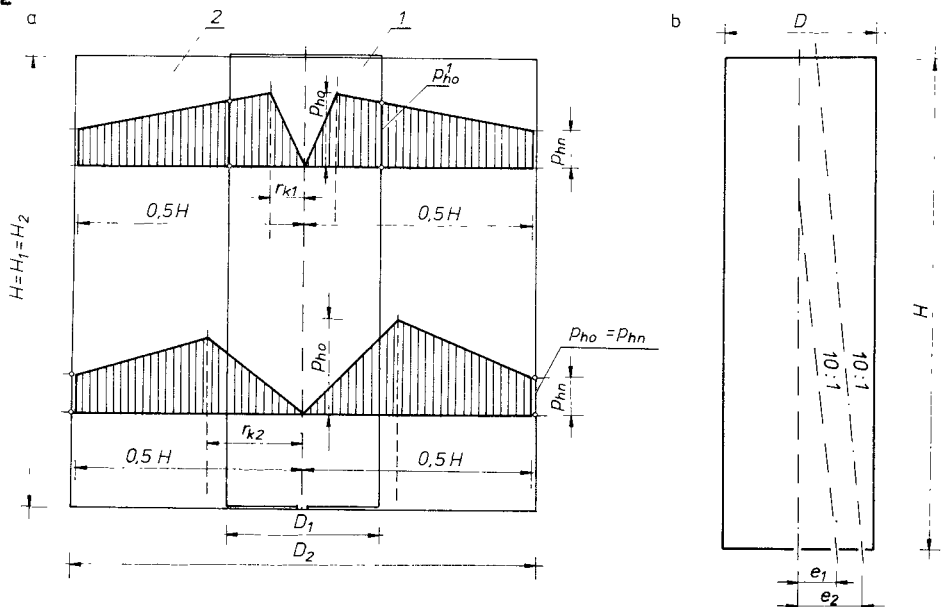
Geometryczne proporcje komory silosu	Mimośród e	S_1	S_2/α
$1,5 \leq H : D \leq 2,00$	$e \leq 0,10 D$	0,00	-
	$0,10 D < e \leq 0,20 D$	0,20	-
	$e > 0,30 D$	0,20	$0,7/50^\circ$
$1,0 < H : D < 1,5$	$e \leq 0,10 D$	0,00	-
	$0,10 D < e \leq 0,25 D$	0,15	-
	$e > 0,30 D$	0,15	$0,7/40^\circ$
$H : D \leq 1,0$	$e \leq 0,10 D$	0,00	-
	$0,10 D < e \leq 0,30 D$	0,10	-
	$e > 0,30 D$	0,10	$0,7/30^\circ$



Rys.5.32. Schematy obciążeń silosów na cukier (propozycja autora)
Fig.5.32. Loads acting on silos for sugar storing (author's own proposal)

W pracy [44] autor przedstawił uogólnioną graficzną propozycję wyznaczania naporu poziomego w silosach opróżnianych niesymetrycznie bez względu na smukłość komór i rodzaj zasypanego materiału.

Propozycja ta opiera się na przyjęciu rozkładu poziomego naporu materiału sypkiego wzdłuż średnicy silosu, powstającego w trakcie opróżniania komory przez otwór wysypowy usytuowany w jej osi w kształcie przedstawionym na rys. 5.33. Założono przy tym, że maksymalne wartości naporu poziomego opróżniania powstają na granicy rdzenia przepływu materiału sypkiego. W osi tego rdzenia wartość naporu równa jest zero. W odległości $0,5 H$ od osi rdzenia przepływu wartości naporu opróżniania są równe wartościom naporu napełniania.

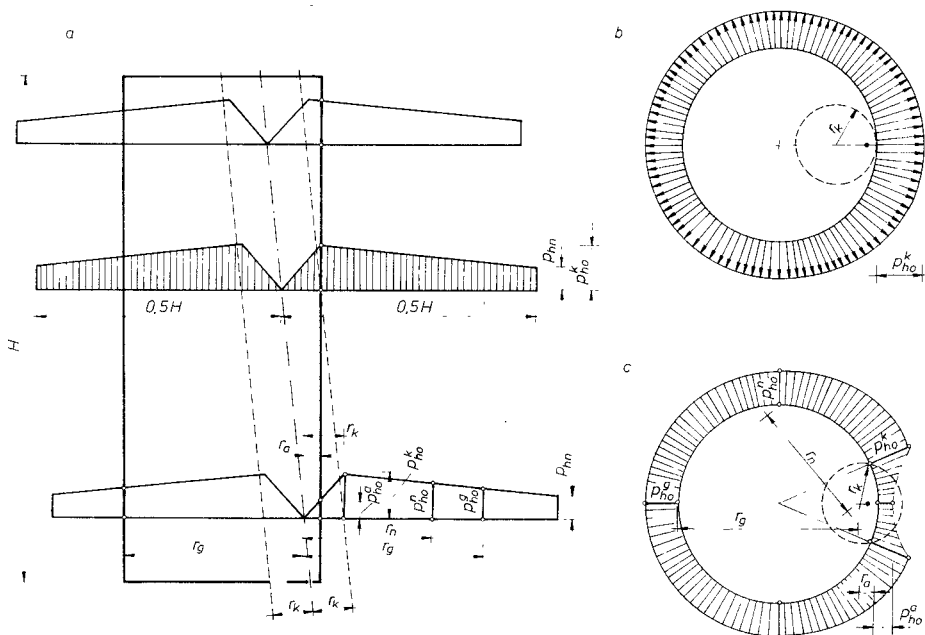


Rys.5.33. Wykres rozkładu naporu poziomego materiału sypkiego wzdłuż średnicy silosu: a - przykład rozkładu naporu poziomego w dwóch silosach o jednakowej wysokości komory, lecz różnej średnicy, b - schemat nachylenia osi rdzenia przepływu materiału sypkiego dla różnych mimośrodków usytuowania otworów wysypowych

Fig.5.33. The distribution of a bulk solid horizontal pressure measured along the diameter of a silo: a - horizontal pressure distribution in two silos with chambers of the same height but different diameter, b - the inclination of the axis of the core of a bulk solid flow for different eccentrics of outlet gates

Na rysunku 5.33a zamieszczono przykładowe rozkłady naporu poziomego dla dwóch silosów o różnych smukłościach komór. W komorze o średnicy D_1 , w trakcie jej opróżniania tworzy się rdzeń przepływu o średniej wartości promienia równej r_{k1} . Na ściany komory działa napór poziomy p_{ho}^1 o wartości znacznie przekraczającej napór napełniania p_{hn} . W silosie o zmniejszonej smukłości o średnicy $D_2 > H$ tworzy się rdzeń przepływu o promieniu r_{k2} . Na ścianach silosu nie obserwuje się w tym przypadku żadnego wzrostu wartości naporu opróżniania, tzn. p_{ho}^2 będzie równe p_{hn} .

W silosach z opróżnianiem niesymetrycznym (rys.5.33b) przyjęto, że pochylenie rdzenia osi przepływu wynosi 10 : 1. Wynika to m.in. z odchylenia rdzenia przepływu spowodowanego istnieniem tarcia na ścianie silosu. Przyjęty kąt pochylenia powoduje, że maksymalne wartości naporu poziomego występują na wysokości około $10 r_h$, co zgodne jest z przedstawionymi wynikami badań.



Rys.5.34. Wykresy naporu poziomego w silosie opróżnianym niesymetrycznie: a - rozkład naporu w przekroju pionowym silosu, b - schemat obciążenia na poziomie przecięcia zewnętrznej krawędzi rdzenia przepływu ze ścianą komory, c - schemat obciążenia w dolnej strefie silosu

Fig.5.34. Horizontal pressure in a non-symmetrically discharged silo: a - pressure across the transverse section of a silo, b - pressure at the level where the external edge of the core of a flow intersects with the wall of a chamber, c - loads acting in the lower part of a silo

Maksymalna wartość naporu poziomego p_{ho}^k występującego na granicy rdzenia przepływu będzie różna dla różnych materiałów. Wartości p_{ho}^k proponuje się przyjmować następujące:

- pszenica $p_{ho}^k = 2,0 p_{hn}$,
- jęczmień $p_{ho}^k = 1,7 p_{hn}$,
- ryż $p_{ho}^k = 1,3 p_{hn}$,
- węgiel $p_{ho}^k = 2,0 p_{hn}$,
- cukier $p_{ho}^k = 1,2 p_{hn}$.

Wartość promienia rdzenia przepływu zależy będzie od parametrów geometrycznych komory oraz prędkości wypływu materiału sypkiego z silosu. Wartość tego promienia można określić następującym wzorem:

$$r_k = \frac{Q}{Q_{50}} r_h \cos \phi_u,$$

gdzie

Q_{50} - wydatek opróżniania równy 50 t/h,

Q - wydatek opróżniania w rozpatrywanym silosie.

Na rysunku 5.34 przedstawiono sposób wyznaczenia rozkładu naporu poziomego materiału sypkiego wzdłuż obwodu przekroju poziomego okrągłego silosu, opróżnianego przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie. Odległościom r na rys. 5.34c, wyznaczonym od osi rdzenia, odpowiadają wartości naporu poziomego opróżniania na wykresie przedstawionym na rys. 5.34a. Z przedstawionego przykładu wynika, że w dolnej strefie silosu (rys. 5.34/c) po stronie otworu wysypowego występuje spadek wartości naporu. W górnej strefie komory (rys. 5.34b) w punkcie, w którym tworząca rdzenia przepływu przecina ścianę silosu, otrzymuje się maksymalną wartość naporu poziomego opróżniania p_{ho}^k .

5.7. Wnioski

Badania silosów opróżnianych niesymetrycznie pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

1. Proponowane obecnie w przepisach normowych schematy obciążeń niesymetrycznych opróżnianych silosów znacznie różnią się od wyników uzyskanych z badań eksperymentalnych.
2. Wartości i rozkład naporu poziomego zależą od wartości mimośrodów opróżniania i smukłości komory, kształtu dna oraz od rodzaju materiału sypkiego.
3. Wzrost mimośrodów opróżniania powoduje zwiększenie nierównomierności rozkładu naporu poziomego.
4. W trakcie opróżniania przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie komory występuje charakterystyczny dla opróżniania niesymetrycznego rozkład naporu poziomego. W przekroju pionowym bezpośrednio po stronie otworu wysypowego w dolnej strefie silosu występuje spadek wartości naporu poziomego, w górnej strefie zaś mamy do czynienia z jego znacznym wzrostem. W przekrojach bocznych wartości naporu poziomego wzrastają wzdłuż całej wysokości komory. W niektórych badaniach stwierdzony został również wzrost naporu poziomego na ścianie po przeciwnej stronie w stosunku do wypływu materiału sypkiego.
5. Wartości wzrostu naporu poziomego w silosach o różnej smukłości zależą od rodzaju materiału sypkiego. W silosach okrągłych wypeł-

nionych pszenicą względny wzrost wartości naporu poziomego po stronie otworu wysypowego (odniesiony do naporu napełniania) jest wyższy aniżeli w silosach o dużej smukłości. W silosach wypełnionych piaskiem zależność ta wygląda odwrotnie.

6. Na wartość i rozkład naporu poziomego powstającego w trakcie opróżniania niesymetrycznego ma istotny wpływ kształt dna silosu. W komorach z lejem ostrosłupowym wzrost wartości naporu poziomego jest wyższy aniżeli w komorach wyposażonych w płaskie dno.

7. Towarzysząca opróżnianiu niesymetrycznemu zwiększona pulsacja naporu jest wynikiem warstwowego usuwania się materiału sypkiego w kierunku otworu wysypowego.

8. Opracowana przez autora graficzna propozycja wyznaczania wartości i rozkładu naporu poziomego, uwzględniająca wpływ mimośrodowo opróżniania, smukłości komory, intensywności opróżniania oraz rodzaj materiału sypkiego dostatecznie odzwierciedla wyniki badań eksperymentalnych.

6. NAPÓR MATERIAŁU SYPKIEGO W SILOSIE TYPU KONCENTRYCZNEGO

6.1. Wstęp

Koncentryczne silosy składają się najczęściej z dwóch lub trzech cylindrycznych powłok. Dzięki wykonaniu kilku komór jest możliwe magazynowanie materiału sypkiego o różnej granulacji bądź różnych gatunkach. Współśrodkowe usytuowanie prowadzi do dużego zmniejszenia wartości naporu poziomego, co ułatwia budowanie silosów o znacznych wymiarach geometrycznych.

Wewnętrzne powłoki stanowią często dodatkowe podparcie konstrukcji nadkomorowych stropów silosu. Środkowa komora może być wykorzystana jako operacyjna wieża służąca do transportowania materiału sypkiego. Projektowane mogą być także rozwiązania, w których środkowa komora spełnia rolę perforowanej rury eliminującej w trakcie opróżniania silosu wzrost naporu poziomego.

Wymienione charakterystyczne cechy kwalifikują silosy koncentryczne do grupy obiektów o stosunkowo niskich kosztach budowy.

Awaria wewnętrznej komory dwucylindrowego silosu w 1967 roku [125] zwróciła uwagę na konieczność badań mających na celu określenie obciążeń działających na ściany i dno w różnych warunkach eksploatacji w tego typu obiektach.

6.2. Przegląd wybranych wyników badań eksperymentalnych

Hierlein [47] prowadził badania naporu materiału sypkiego w dwucylindrowym modelu silosu o proporcji obydwu średnic 1 : 4. Obydwie komory wykonano z pleksiglasu. Średnice zewnętrznej i wewnętrznej komory wynosiły 0,80 m i 0,20 m, a wysokość komór - 2,10 m. Model silosu miał płaskie dno wyposażone w cztery otwory wysypowe.

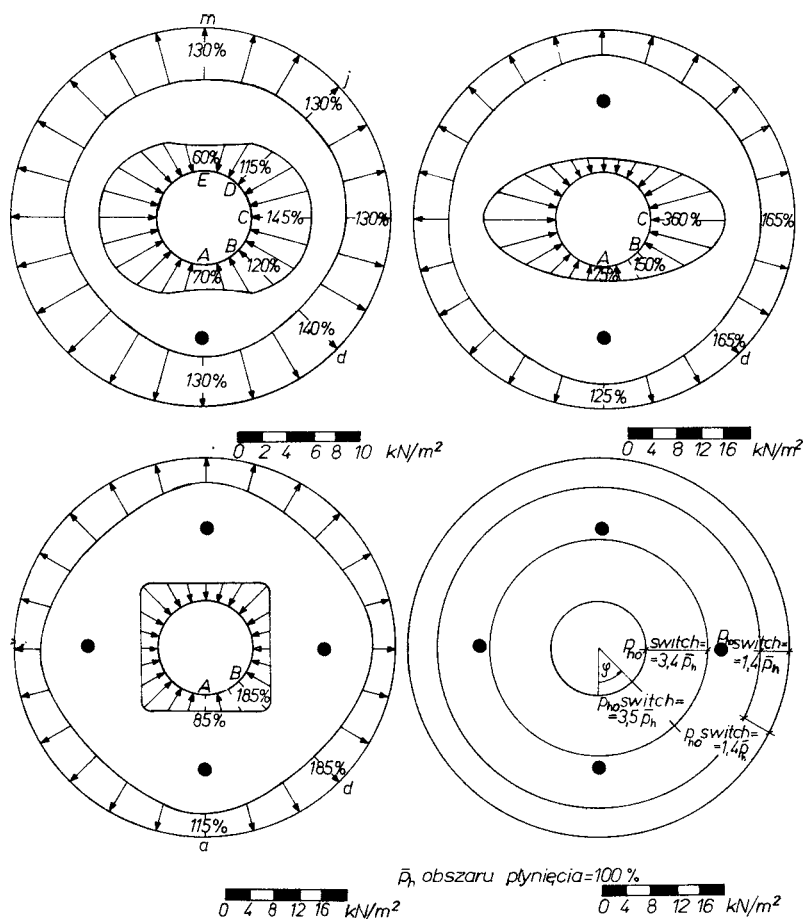
Jako materiał sypki zastosowano kwarcowy piasek o następujących cechach fizycznych:

- ciężar objętościowy - $1,56 \text{ kN/m}^3$,
- kąt tarcia wewnętrznego - 43° ,
- kąt tarcia piasku o ścianę silosu - $21,5^\circ$.

Wykonane przez Hierleina pomiary wykazały, że napór poziomy napełniania osiągnął zaledwie na ścianach wewnętrznych komory 50%, a na ścianach zewnętrznej komory 65% wartości obliczonych teoretycznie. Pomierzone tarcie P_{wf} było również znacznie mniejsze niż siły tarcia występujące w pojedynczym silosie jednocylindrowym.

Na podstawie dokonanych obserwacji określono obszary płynięcia bądź spoczynku materiału sypkiego, między którymi występują obszary pośrednie. W trakcie opróżniania komory pierścieniowej tworzył się lej wypływu, którego średnica zwiększała się ku górze, aż do zetknięcia się obwodu leja z powierzchnią ścian obydwu komór. Opróżnianie modelu silosu wywoływało znaczny wzrost wartości naporu poziomego kwarcowego piasku oraz nierównomierny rozkład tego naporu wzdłuż obwodów komory zewnętrznej i wewnętrznej. Podczas opróżniania przez jeden lub dwa otwory wysypowe maksymalne wartości naporu poziomego wystąpiły w przekrojach pionowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi tych otworów. Zarejestrowane w tych przekrojach wartości naporu były nawet 4,4 razy większe niż średnie wartości naporu występujące w obszarze płynięcia materiału sypkiego.

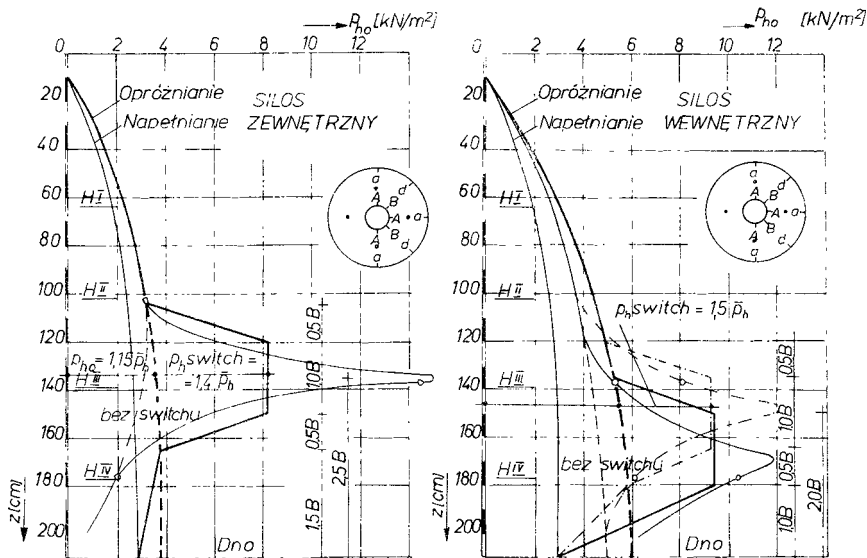
Podczas jednoczesnego opróżniania przez cztery otwory maksymalne wartości naporu poziomego piasku pojawiły się w przekrojach między otworami wysypowymi. Wartości tego naporu były około 1,85 razy większe od średnich wartości naporu opróżniania pomierzonych w obszarze płynięcia. Oprócz tego, w dolnej części komór modelu silosu zarejestrowano znaczne lokalne wzrosty naporu poziomego ("Switch"). Na powierzchni komory wewnętrznej, w pobliżu wypływu materiału sypkiego, różnica wartości naporu w stosunku do wartości średnich w całym obszarze płynięcia wynosiła 340%. W przekrojach pionowych usytuowanych między otworami wysypowymi różnica naporu wynosiła 350%. Wybrane wyniki badań Hierleina przedstawiono na rys. 6.1 i 6.2.



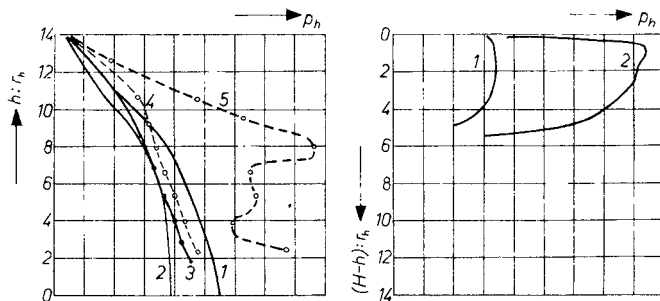
Rys.6.1. Wykresy naporu poziomego w przekroju modelu dwucylindrowego silosu [47]
 Fig.6.1. Horizontal pressure across the transverse section of a two-cylinder model of a silo [47]

Aleksandrović i in. [2] wykonali badania eksperymentalne naporu zboża w modelach silosów dwucylindrycznych, których średnice komór zewnętrznych wynosiły $D_{z1} = 350 \text{ mm}$ i $D_{z2} = 585 \text{ mm}$. Wysokości ścian były równe $4D_z$ lub $2D_z$. Iloraz średnic wewnętrznych i zewnętrznych komór perforowanych wynosił $d : D = 0,33-0,55$ i $0,78$. Jako materiał wypełniający zastosowano pszenicę o ciężarze objętościowym $\gamma_0 = 0,8 \text{ kN/m}^3$.

Badania Aleksandrovića wykazały, że ciężar pszenicy zawieszającej się dzięki siłom tarcia na ścianach komór rozdziela się nierównomiernie. Na jednostkę powierzchni ściany perforowanej komory wewnętrznej, od strony komory pierścieniowej, działają większe pionowe siły tarcia ani-



Rys.6.2. Wykresy naporu poziomego w przekroju pionowym modelu dwucylindrycznego silosu [47]
Fig.6.2. Horizontal pressure across the vertical section of a two-cylinder model of a silo [47]



Rys.6.3. Zmiany naporu poziomego na ścianach zewnętrznej komory silosu dwucylindrowego opróżnianego przez perforowaną komorę wewnętrzną: a - napór poziomy: 1 - wg SN 302-65 dla $r_h = 0,25 D$, 2 - wg SN 302-65 dla $r_h = 0,25 (D-d)$, 3 - napór na ścianie zewnętrznej po napełnieniu modelu silosu, 4 - napór na ścianie zewnętrznej w trakcie opróżniania, 5 - w zwykłym jednokomorowym silosie; b - zmiany naporu poziomego na wysokości $h : r_h = 8,1$ - w silosie dwucylindrowym, 2 - w silosie jednokomorowym [2]

Fig.6.3. The variations of the horizontal pressure acting on the walls of the external chamber of a two-cylinder silo discharged through the internal perforated chamber: a - horizontal pressure - acc.to SN 302-65 for $r_h = 0.25 D$, 2 - acc. to SN 302-65 for $r_h = 0.25 (D-d)$, 3-pressure on the external wall after filling the model of a silo, 4-pressure on the external wall during discharging, 5 - conventional one-chamber silo, b - horizontal pressure at the level $h/r_h = 8.1$ - in a two-chamber silo, 2 - in a one-chamber silo [2]

żeli na powierzchni silosu zewnętrznego. Oprócz tego zauważono, że wartości jednostkowych sił tarcia zwiększały się wraz ze zmniejszeniem się ilorazu średnic $D_w : D_z$ w następującym stopniu:

$$- D_w : D_z = 0,78 \quad p_{tw} = 1,2 p_{tz},$$

$$- D_w : D_z = 0,55, \quad p_{tw} = 1,4 p_{tz}$$

$$- D_w : D_z = 0,33, \quad p_{tw} = 1,6 p_{tz},$$

gdzie

indeks w oznacza komorę wewnętrzną, zaś indeks z oznacza komorę zewnętrzną.

Ze zmniejszeniem się ilorazu $D_w : D_z$ zwiększała się także wartość naporu poziomego. Na przykład gdy $D_w : D_z = 0,33$, zarejestrowano na ścianach komory wewnętrznej maksymalne wartości naporu, które w odniesieniu do naporu pomierzonego na ścianie zewnętrznej wynosiły $p_{hw} = (1,6 \text{ do } 1,8) p_{hz}$. W trakcie opróżniania pierścieniowej komory silosu napór działający na ścianę komory wewnętrznej ulegał znacznemu powiększeniu, przy czym jego składowa pionowa (tarcie) rosła bardziej intensywnie aniżeli składowa pozioma.

Wykorzystanie komory wewnętrznej jako perforowanej rury spowodowało znaczne zmniejszenie wartości naporu poziomego działającego na ścianę komory zewnętrznej. Przykładowe wykresy naporu badań [2] przedstawiono na rys. 6.3. Wyniki tych badań wykazały, że wartości naporu poziomego w koncentrycznym silosie opróżnianym przez perforowaną ścianę komory wewnętrznej są znacznie mniejsze aniżeli w zwykłym silosie jednokomorowym. W trakcie opróżniania na ścianach komory zewnętrznej nie zanotowano jakichkolwiek wzrostów wartości naporu.

6.3. Badania własne

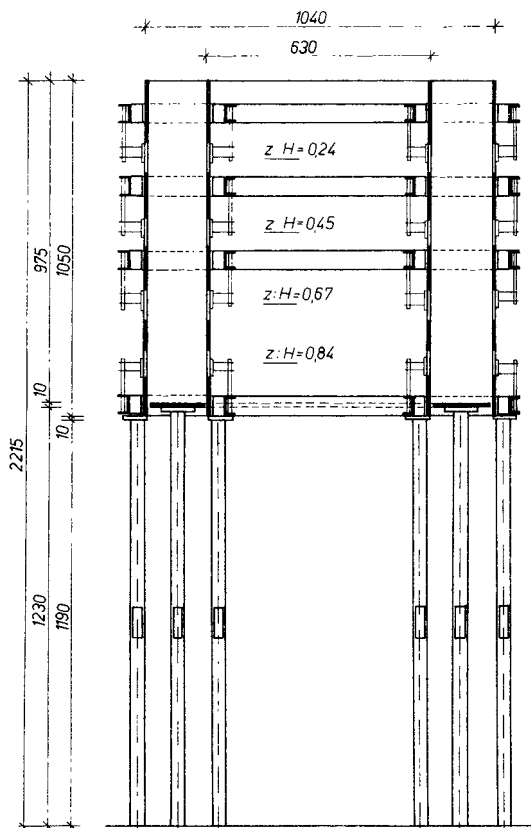
6.3.1. Opis badań

Konstrukcję modelu zaprojektowano tak, aby umożliwić pomiary następujących wielkości:

- naporu poziomego materiału sypkiego na ściany modelu silosu,
- sił tarcia materiału sypkiego o ściany komór,
- pionowego obciążenia globalnego dna komory pierścieniowej,
- pionowego obciążenia globalnego wewnętrznej i zewnętrznej ściany komory.

Przekrój zaprojektowanego modelu silosu koncentrycznego pokazano na rys. 6.4.

Ściany komór modelu wykonano z blachy grubości 5 mm. Każda komora oparta jest na trzech stalowych słupach. Również dno modelu, które wyko-



Rys.6.4. Przekrój pionowy badanego modelu silosu dwucylindrowego
Fig.6.4. Vertical section of the model of a two-cylinder silo studied

nano jedynie w komorze pierścieniowej, opiera się na niezależnych podporach [40].

Do pomiaru naporu zastosowano czujniki o konstrukcji podobnej do czujników opracowanych przez Hierleina [47]. Czujniki te umożliwiają pomiar dwóch składowych oddziaływań materiału sypkiego, tzn. wartości naporu poziomego oraz wartości sił tarcia. Czujniki zamocowane są do sztywnych pierścieni stalowych, umieszczonych na zewnętrznych i wewnętrznych ścianach komór modelu silosu. Usytuowanie pomiarowych czujników na powierzchni obydwu ścian przedstawiono na rys. 6.5.

Rozmieszczenie czujników według rys. 6.5 umożliwiło pomiar wartości naporu w dwóch przekrojach pionowych po stronie wypływu, w jednym przekroju po stronie przeciwniej, a także w przekroju poziomym usytuowanym w środkowych częściach obydwu komór.

Cechy fizyczne pszenicy i cukru

Materiał syпки	Ciężar objętościowy kN/m^3		Kąt tarcia wewnętrznego $[\text{°}]$
	stan luźny	stan zagęszczony	
pszenica	8,08	9,13	29,8
cukier	8,08	9,22	31,8

Jako materiał syпки wypełniający komorę pierścieniową modelu silosu stosowano cukier lub pszenicę, których wartości cech fizycznych zestawiono w tab. 6.1.

Warto podkreślić, że fizyczne cechy zmieniały się w trakcie pomiarów. Na przykład cukier po 10 cyklach przesypywania w silosie nie wykazywał prawie żadnej wilgotności, a jego ciężar objętościowy zmieniał się, i przyjmował następujące wartości:

- w stanie luźnym $\gamma_0 = 8,17 \text{ kN/m}^3$,
- w stanie zagęszczonym $\gamma_0 = 9,43 \text{ kN/m}^3$.

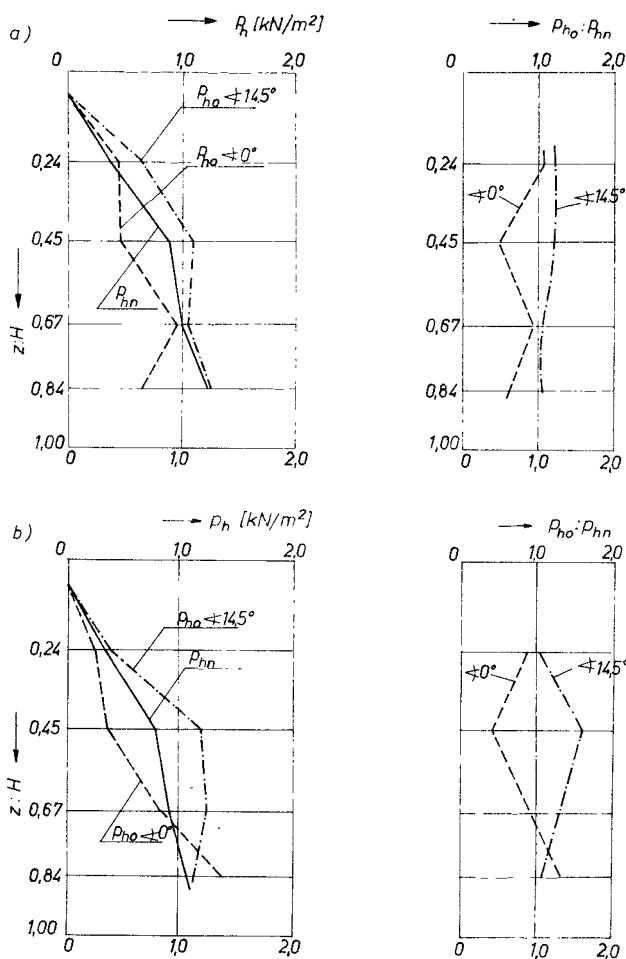
Zmiany ciężaru objętościowego pszenicy były znacznie mniejsze.

Napełnienie komory pierścieniowej modelu silosu odbywało się równomiernie na całej jej powierzchni. Było to możliwe dzięki zastosowaniu stalowego stożka o średnicy 650 mm, który umieszczono bezpośrednio nad badanym modelem. Materiał syпки podawano z dodatkowego zbiornika znajdującego się nad stożkiem zasypowym. Model silosu opróżniano przez otwory wysypowe o średnicy 25 mm, usytuowane w dnie w odległościach co 8 cm przy ścianach zewnętrznej i wewnętrznej komory. Intensywność grawitacyjnego opróżniania wynosiła około 3,3 kN/h.

6.3.2. Wyniki pomiarów

W trakcie badań stwierdzono, że duży wpływ na wartości naporu ma usytuowanie otworu wysypowego. W zależności od tego, czy otwór ten znajdował się przy ścianie zewnętrznej, czy przy ścianie wewnętrznej, uzyskiwano różne rozkłady naporu poziomego. Przykładowe wykresy naporu poziomego cukru przedstawiono na rys. 6.6 i 6.7.

Na rysunkach tych po prawej stronie zamieszczono również wykresy współczynników zmian naporu poziomego, wyrażonego w postaci ilorazów naporu opróżniania i naporu napełniania ($p_{ho} : p_{hn}$). Iloraz ten obrazuje wzrost lub spadek wartości naporu cukru na ścianach obydwu komór w trakcie opróżniania przestrzeni pierścieniowej silosu koncentrycznego. Wartości ilorazu $p_{ho} : p_{hn}$ zestawiono w tab. 6.2.

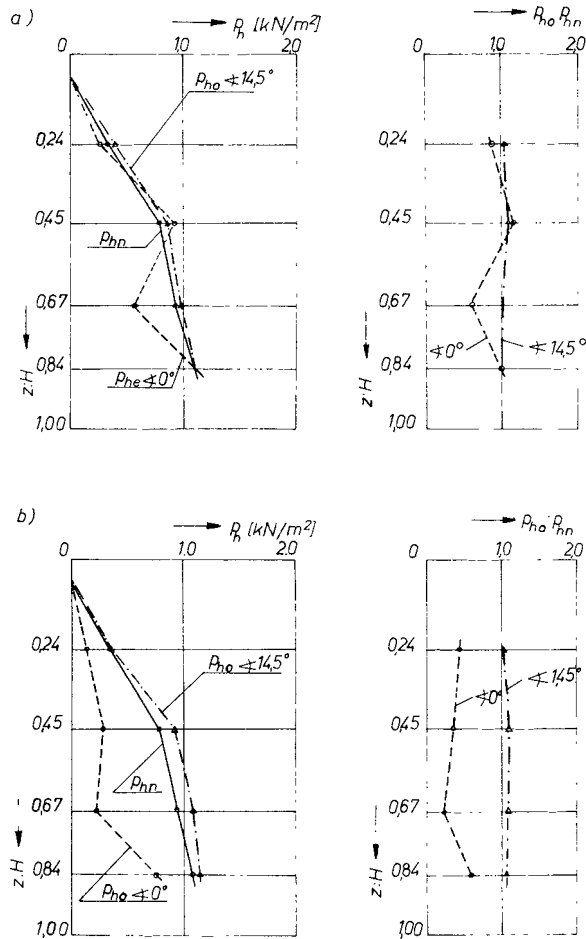


Rys.6.6. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu typu koncentrycznego w trakcie opróżniania komory pierścieniowej przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie zewnętrznej; a - silos zewnętrzny, b - silos wewnętrzny (p_{hn} - napór napełniania) p_{ho} - napór opróżniania)

Fig.6.6. Sugar horizontal pressures in the model of a concentric silo during discharging of a ring chamber through the outlet gate located at the external wall, a - external silo, b - internal silo, (p_{hn} - filling pressure, p_{ho} - discharging pressure)

Z przedstawionych na rys. 6.6 i 6.7 wykresów wynika, że na rozkład i wartości naporu poziomego zasadniczy wpływ mają następujące czynniki:

- usytuowanie otworu wysypowego (przy ścianie komory wewnętrznej lub przy ścianie komory zewnętrznej)
- odległość punktu pomiarowego (czujnika) od otworu wysypowego.



Rys.6.7. Wykresy naporu poziomego cukru w modelu silosu typu koncentrycznego w trakcie opróżniania komory pierścieniowej przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie wewnętrznej: a - silos zewnętrzny, b - silos wewnętrzny

Fig.6.7.. Sugar horizontal pressures in the model of a concentric silo during discharging of a ring chamber through the outlet gate located at the internal wall: a - external silo, b - internal silo

Opróżnianie przez otwór wysypowy położony przy ścianie zewnętrznej spowodowało pojawienie się maksymalnych wzrostów naporu poziomego cukru w przekroju bocznym komory wewnętrznej ($\pm 14,5^\circ$). Maksymalna wartość ilorazu $P_{ho} : P_{hn}$ wystąpiła na poziomie $z : H = 0,45$ i wynosiła aż 1,60.

Podczas opróżniania komory pierścieniowej przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie wewnętrznej zanotowano największe spadki wartości

T a b e l a 6.2

Wartości ilorazu naporu poziomego napełniania i naporu opróżniania
w przekrojach pionowych po stronie wypływu w modelu
siloś koncentrycznego

Poziom z : H	Iloraz $p_{ho} : p_{hn}$							
	Otwór wysypowy przy ścianie zewnętrznej				Otwór wysypowy przy ścianie wewnętrznej			
	komora zewnętrzna		komora wewnętrzna		komora zewnętrzna		komora wewnętrzna	
	$\angle 0^\circ$	$\angle 14,5^\circ$	$\angle 0^\circ$	$\angle 14,5^\circ$	$\angle 0^\circ$	$\angle 14,5^\circ$	$\angle 0^\circ$	$\angle 14,5^\circ$
0,24	1,06	1,19	0,86	1,05	0,86	1,03	0,41	1,00
0,45	0,47	1,19	0,44	1,60	1,16	1,12	0,34	1,16
0,67	0,90	1,00	0,91	1,32	0,60	1,00	0,20	1,15
0,84	0,60	1,00	1,32	1,15	1,00	1,00	0,70	1,04

naporu poziomego w przekroju pionowym, leżącym naprzeciwko otworu wysypowego ($\angle 0^\circ$). Spadki te sięgnęły nawet 80% wartości naporu pomierzonego po napełnieniu komory (patrz poziomy z : H = 0,67, gdzie $p_{ho} : p_{hn} = 0,20$).

W celu dokonania oceny stopnia nierównomierności rozkładu naporu poziomego cukru na ścianach komór po stronie wypływu obliczono wartości odchylenia standardowego ilorazu $p_{ho} : p_{hn}$. Ze względu na niewielką liczbę punktów pomiarowych umieszczonych po stronie wypływu (8 czujników), obliczenia wykonano na podstawie rozkładu Studenta.

Otrzymano następujące wartości odchylen standardowych:

1. Opróżnianie przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie zewnętrznej:

- komora zewnętrzna $n = 0,24$
- komora wewnętrzna $n = 0,32$.

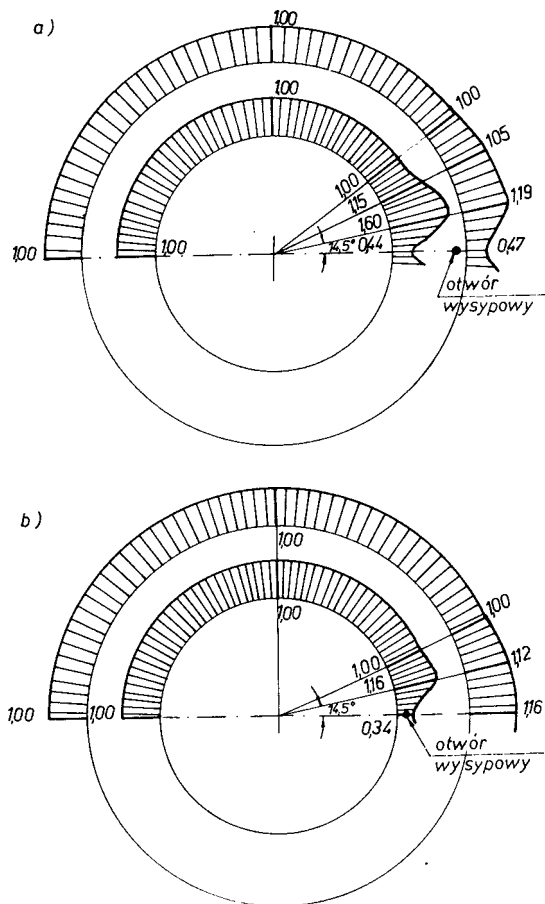
2. Opróżnianie przez otwór wysypowy położony przy ścianie wewnętrznej:

- komora zewnętrzna $n = 0,16$
- komora wewnętrzna $n = 0,36$.

Wartości odchylen standardowych wykazują, że największa nierównomierność rozkładu naporu poziomego występuje na ścianach komory wewnętrznej.

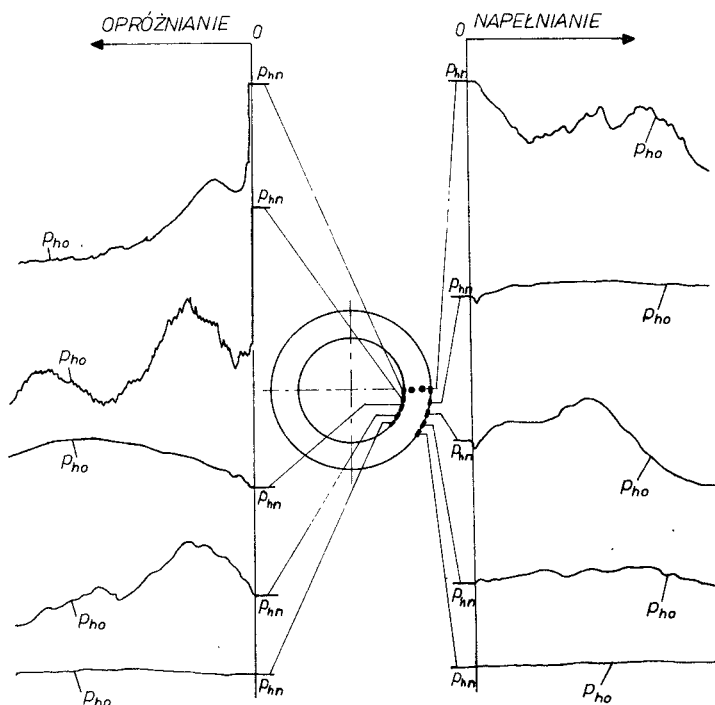
Prawie we wszystkich punktach pomiarowych umieszczonych wzdłuż przekroju pionowego, usytuowanego bezpośrednio przy otworze wysypowym ($\angle 0^\circ$), zanotowano w momencie rozpoczęcia opróżniania spadki wartości

naporu ($p_{ho} : p_{hn} < 1,0$). W przekrojach odchylonych o kąt $14,5^\circ$ występował wzrost wartości naporu poziomego poza niektórymi punktami, w których napór pozostawał nie zmieniony ($p_{ho} : p_{hn} \geq 1,0$).



Rys.6.8. Rozkład naporu poziomego cukru w przekroju poziomym silosu na poziomie $z : H = 0,45$: a - opróżnianie przez otwór usytuowany przy ścianie zewnętrznej, b - opróżnianie przez otwór usytuowany przy ścianie wewnętrznej (na wykresach opisano wartości ilorazów naporu opróżniania i napełniania)

Fig.6.8. Sugar horizontal pressure across the transverse section of a silo at the level $z:H = 0.45$: a - discharging through the outlet gate located at the external wall, b - discharging through the outlet gate at the internal wall (in the diagram the values of filling-to-discharging pressures ratio are given)



Rys.6.9. Zmiany naporu poziomego wzdłuż obwodów komór modelu dwucylindrowego silosu po stronie wypływu (poziom $z:H = 0,45$)

Fig.6.9. Horizontal pressure variation along the hoop of chambers of the model of a two-cylinder silo on the inlet side (level $z:H = 0.45$)

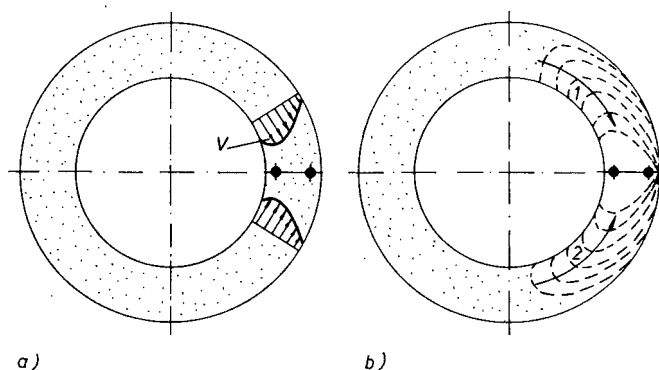
Na rysunku 6.8 przedstawiono wykresy naporu poziomego wzdłuż obwodu przekroju poziomego modelu silosu. W celu zobrazowania stopnia wzrostu wartości naporu w trakcie opróżniania opisano na wykresach również wartości ilorazu $p_{ho} : p_{hn}$. Na podstawie charakteru zmian wartości naporu wzdłuż obwodu ścian komór można wyciągnąć wniosek, że kanał płynięcia cukru ma bardzo małe wymiary. Na przykład podczas opróżniania silosu przez otwór usytuowany przy ścianie komory zewnętrznej zasięg płynięcia cukru można określić za pomocą wycinka koła o rozwartości nieznacznie przekraczającej kąt 58° .

W trakcie opróżniania modelu silosu przez otwór wysypowy usytuowany przy ścianie komory wewnętrznej zasięg obszaru płynięcia cukru jest jeszcze mniejszy (rys.6.8a). Zjawisko to można objaśnić wpływem różnych krzywizn obydwu komór na rodzaj przepływu materiału sypkiego.

Ponieważ czujniki rozmieszczone były wzdłuż obwodów komór w zbyt dużym rozstawie, dokładny rozkład naporu poziomego w przekroju poziomym

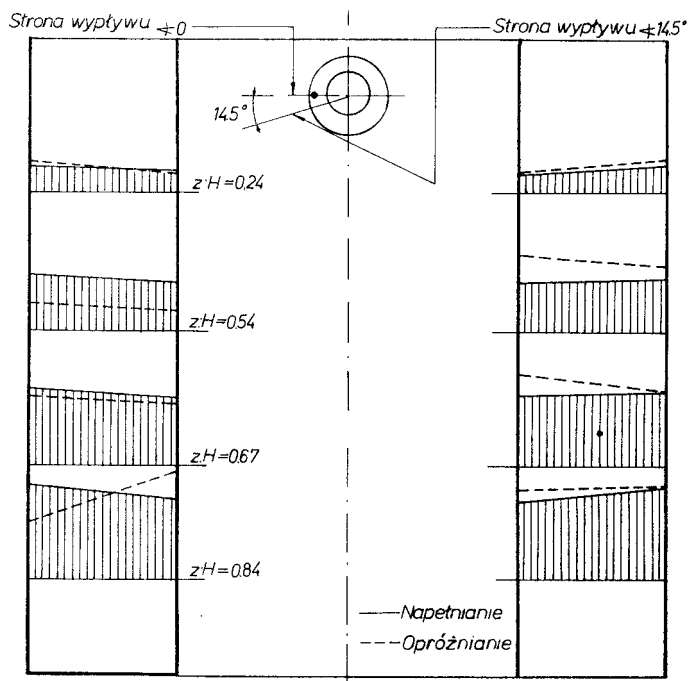
silosu określono pośrednio. Do tego celu wykorzystano dużą liczbę otworów wysypowych, umieszczonych jeden od drugiego w dnie w odległościach nie przekraczających 8 cm. W różnych cyklach pomiarowych komorę pierścieniową modelu silosu opróżniano przez otwory wysypowe położone w coraz większych odległościach od jednego z pionowych rzędów czujników do pomiaru naporu. W ten sposób można było z dostatecznym przybliżeniem określić rzeczywisty zasięg stref zmniejszeń lub wzrostów wartości naporu poziomego w stosunku do naporu pomierzonego po napełnieniu komory.

Na rysunku 6.9 pokazano fragmenty ciągłego zapisu zmian wartości naporu poziomego cukru na ścianach komór po stronie wypływu. W pobliżu otworu wysypowego w momencie rozpoczęcia opróżniania komory pierścieniowej występuje nagły spadek wartości naporu. Charakterystyczne jest również pojawienie się w tym obszarze pulsacji naporu poziomego. W miarę oddalania się od otworu wysypowego zanika pulsacja, a zamiast spadku wartości naporu obserwuje się jego wzrost. Czujniki umieszczone w odległości większej niż 24 cm od otworu wysypowego nie wykazywały w momencie rozpoczęcia opróżniania żadnych nagłych zmian wartości naporu. Występującą w pobliżu otworu wysypowego pulsację można podzielić na dwa typy: makro- i mikropulsację. Zasięg pojawienia się pulsacji wiąże się ściśle z wielkością rdzenia przepływu materiału sypkiego. Warto również podkreślić, że prowadzone jednocześnie pomiary na jednopowłokowych modelach silosów z komorą o smukłości $H : D = 2,0$ nie wykazały żadnej pulsacji naporu cukru w trakcie opróżniania przez otwór usytuowany centralnie.



Rys.6.10. Schemat ideowy ruchu powierzchniowych warstw cukru w komorze pierścieniowej silosu: a - wykres wektorów prędkości, b-kolejność spływu powierzchniowych warstw cukru

Fig.6.10. Schematic diagram of the motion of sugar surface layers in the ring chamber of a silo, a - velocity vectors diagram, b - the order of sugar surface layers run off



Rys.6.11. Rozkład naporu poziomego cukru w przekroju pionowym komory pierścieniowej

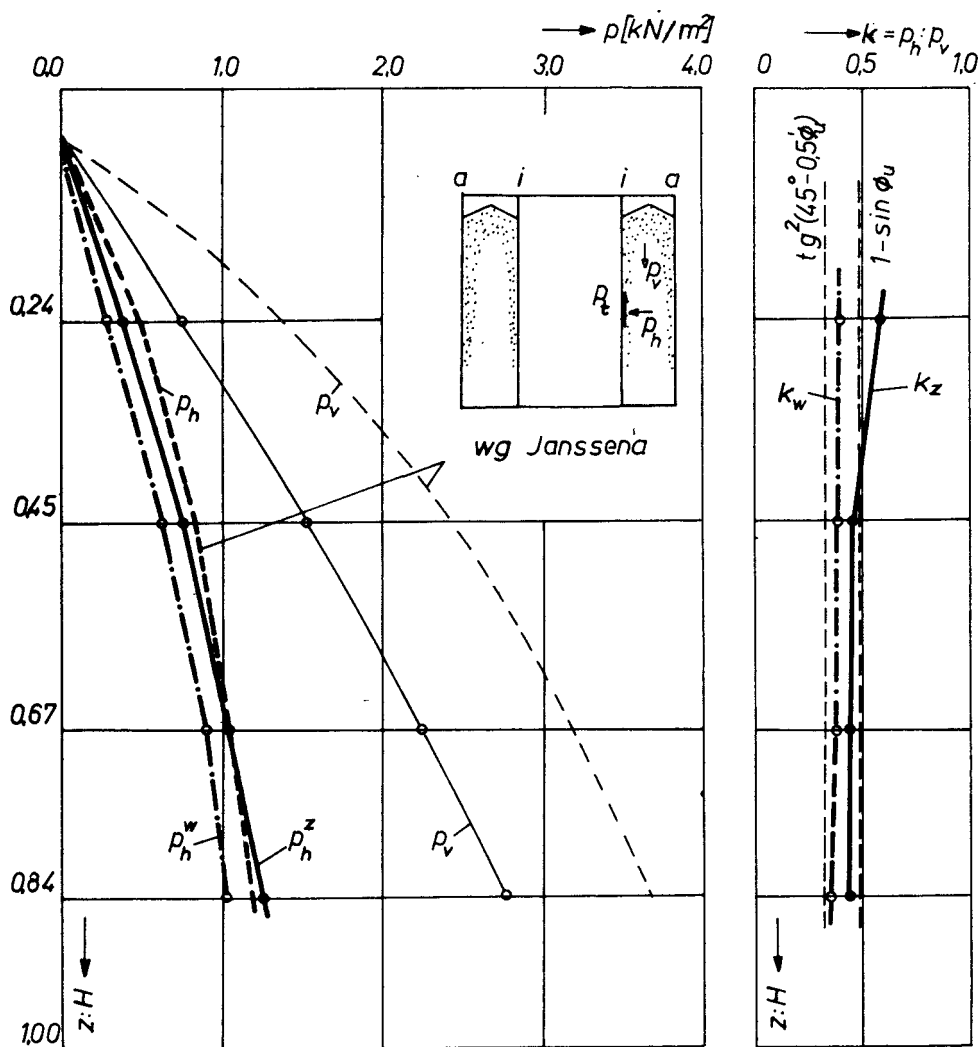
Fig.6.11. Sugar horizontal pressure across the vertical section of the ring chamber

T a b e l a 6.3

Wartości ilorazu poziomego i pionowego naporu w silosie typu koncentrycznego

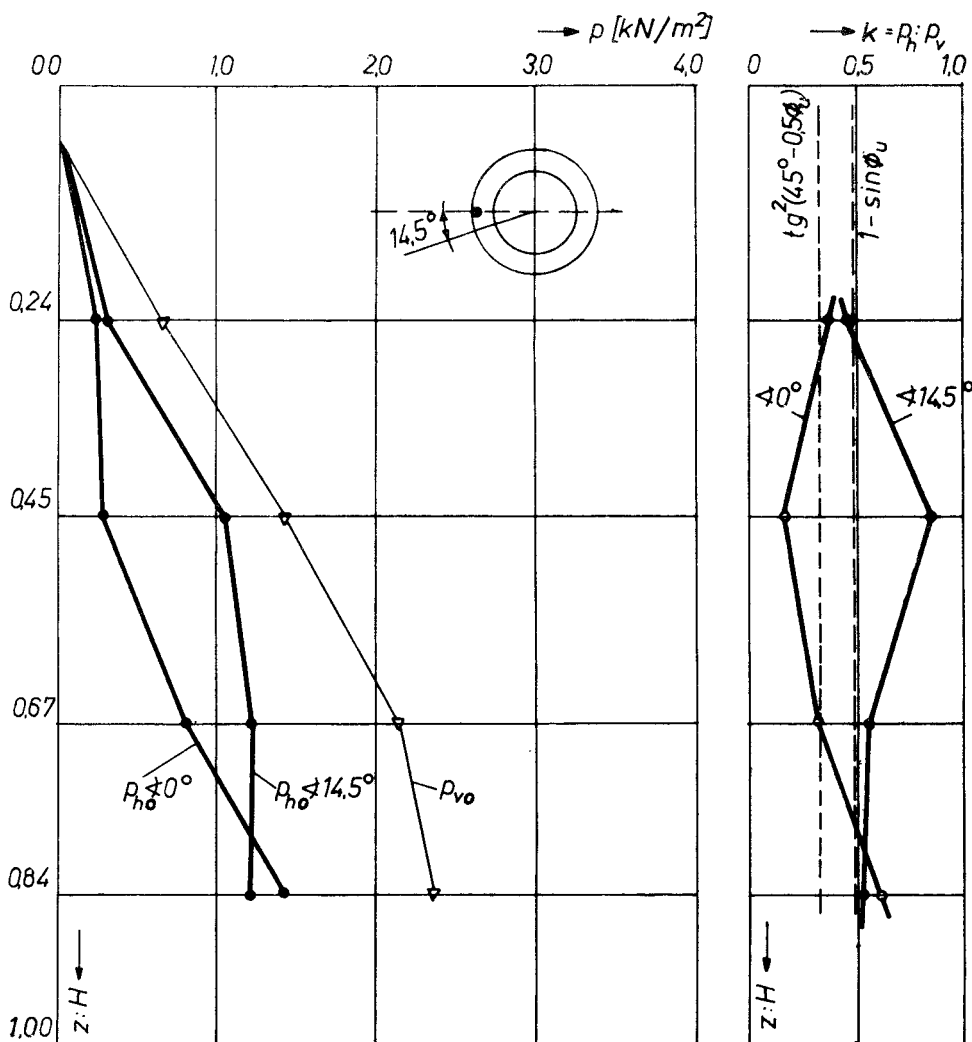
Poziom z : H	Iloraz naporu poziomego i pionowego k					
	napętnianie		opróżnianie			
	komora zewnętrzna	komora wewnętrzna	komora zewnętrzna		komora wewnętrzna	
			0°	14,5°	0°	14,5°
0,24	0,48	0,56	0,66	0,75	0,38	0,45
0,45	0,35	0,45	0,23	0,60	0,17	0,62
0,67	0,32	0,40	0,40	0,44	0,32	0,47
0,84	0,35	0,35	0,23	0,38	0,51	0,43

Interesujące wnioski można wysunąć na podstawie obserwacji ruchu powierzchniowych warstw materiału sypkiego. W badanym modelu silosu koncentrycznego można było stwierdzić, że na górnej powierzchni cukru natychmiast po rozpoczęciu opróżniania tworzy się stożkowy lej, który z u-



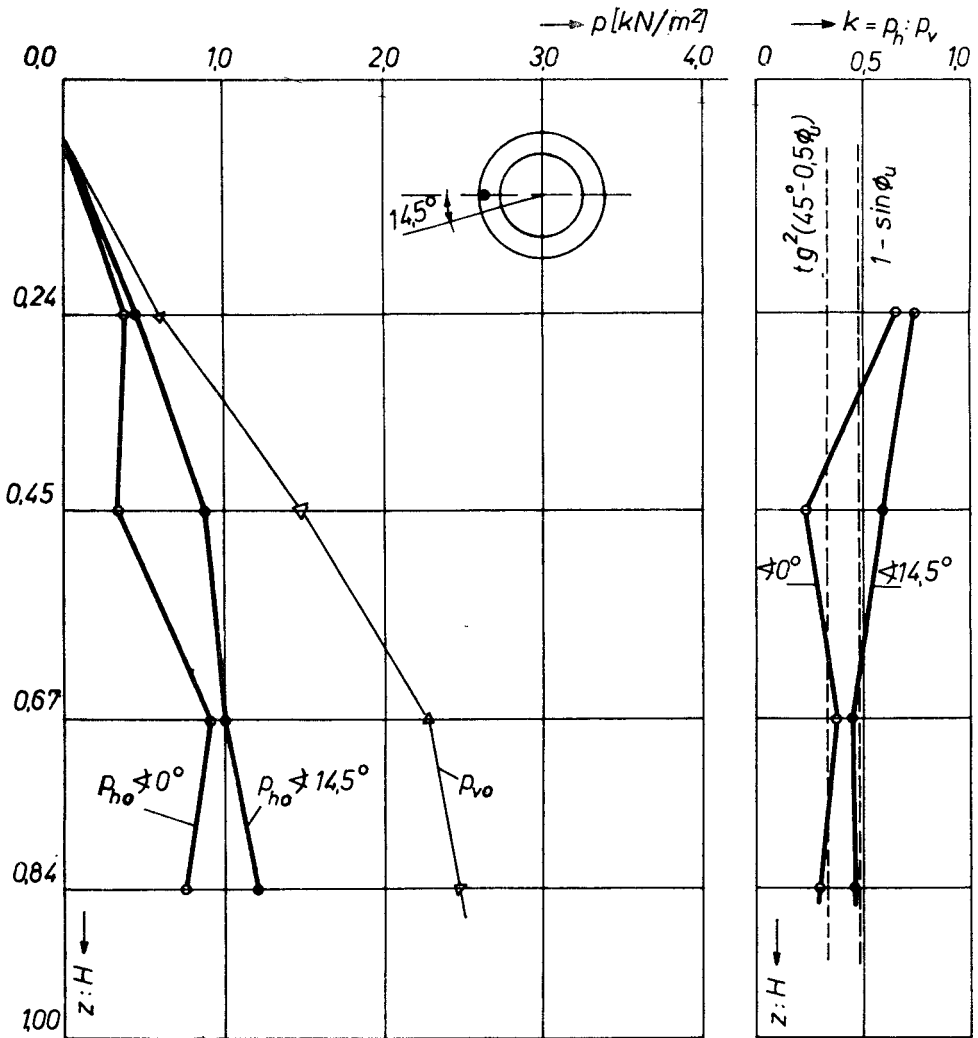
Rys.6.12. Wykresy naporu cukru po napełnieniu komory pierścieniowej modelu silosu: a - napór poziomy i pionowy, b - iloraz naporów p_h i p_v (indeksy: z - komora zewnętrzna, w - komora wewnętrzna)
 Fig.6.12. Sugar pressures after filling of the ring chamber of the model of a silo: a - horizontal and vertical pressures, b - p_h : p_v ratio (indexes: z - external chamber, w - internal chamber)

plywem czasu zwiększa swoje wymiary, a także zmienia kształt z kołowego na elipsowaty. Obserwuje się przy tym znacznie większe prędkości przemieszczania się ziaren cukru przy ściance wewnętrznej aniżeli przy ściance zewnętrznej bez względu na to, z którego otworu nastąpiło opróżnianie (rys.6.10a).



Rys.6.13. Wykresy naporu cukru w trakcie opróżniania komory pierścieniowej przez otwór wysypowy usytuowany przy zewnętrznej ścianie silosu: a - napór poziomy i pionowy, b - iloraz naporów p_h i p_v
 Fig.6.13. Sugar pressures during discharging of the ring chamber through the outlet gate located at the external wall of a silo: a - horizontal and vertical pressures, b - $p_h : p_v$ ratio

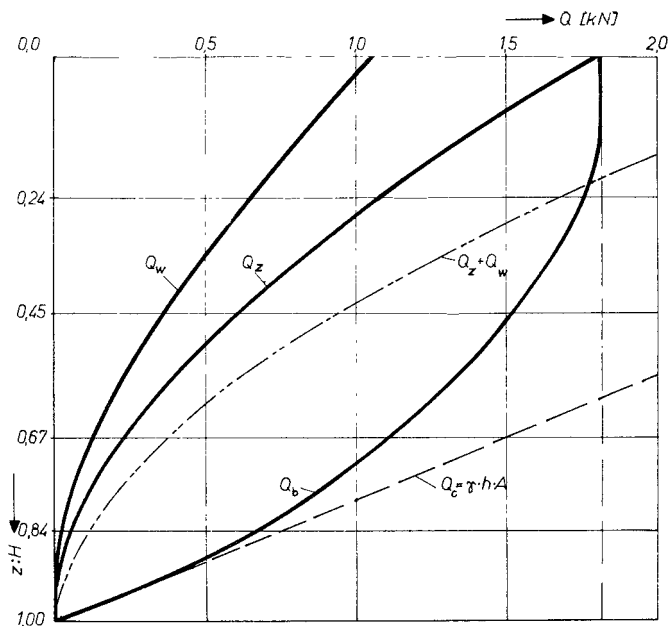
Cukier zsypywał się w kierunku wypływu ruchem warstwowym, którego mechanizm opisano w pracy [68]. Warstwy powierzchniowe cukru zsuwały się na przemian z dwóch przeciwnych sobie kierunków (rys.6.10b). O wzmożonym przepływie cukru przy ścianie wewnętrznej komory świadczyły wskazania czujników umieszczonych na tej ścianie, które pokazały znaczne zmiany wartości naporu (spadek lub wzrost oraz pulsację).



Rys.6.14. Wykresy naporu cukru w trakcie opróżniania komory pierścieniowej przez otwór wysypowy usytuowany przy wewnętrznej ścianie silosu: a - napor poziomy i pionowy, b - iloraz naporów p_h i p_v
 Fig.6.14. Sugar pressures during discharging of the ring chamber through the outlet gate located at the internal wall of a silo: a - horizontal and vertical pressures, b - $p_h : p_v$ ratio

W trakcie napełniania komory pierścieniowej silosu stwierdzono, że wartości naporu poziomego działającego na ściany silosu zewnętrznego są większe niż wartości naporu występującego na ścianie silosu wewnętrznego. W trakcie opróżniania natomiast zarejestrowano w większości punktów pomiarowych przegrupowanie wartości naporu (rys.6.11). Duża liczba czuj-

ników wykazała na ścianach komory wewnętrznej wartości naporu opróżniania znacznie większe niż wartości naporu występującego na ścianie komory zewnętrznej.



Rys.6.15. Obciążenie cukrem dna i ścian komory pierścieniowej modelu silosu typu koncentrycznego (Q_z - obciążenie zewnętrznej ściany, Q_w - obciążenie wewnętrznej ściany, Q_b - obciążenie dna, Q_c - całkowity ciężar cukru zasypywanego do komory silosu

Fig.6.15. Sugar pressure on the floor and the walls of the ring chamber of the model of a concentric silo (Q_z - load acting on the external wall, Q_w - load acting on the internal wall, Q_b - load on the floor. Q_c - total weight of sugar charged into the chamber of a silo)

Na rysunkach 6.12-6.14 przedstawiono wykresy poziomego i pionowego naporu cukru oraz wykresy ich ilorazu. Napór pionowy p_v obliczono z warunków równowagi sił działających w materiale sypkim. Wartości naporu poziomego p_h oraz sił tarcia p_t przyjęto bezpośrednio z pomiarów. Wyznaczone wartości ilorazu p_h i p_v dla komory wewnętrznej i zewnętrznej zestawiono w tab.3.

W przypadku napełniania (rys.6.12) wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego obliczone dla komory wewnętrznej są mniejsze od wartości wyznaczonych dla komory zewnętrznej. W przekrojach pionowych komór maksymalne wartości ilorazów k_w i k_z występują w górnej części silosu, minimalne zaś w jego dolnej części.

Opróżnianie komory pierścieniowej modelu silosu wywołało znaczne zmiany wartości ilorazu k (rys. 6.13 i 6.14). W pionowym przekroju si-

Obciążenia pionowe ścian i dna pierścieniowej komory
w silosie dwucylindrowym

Element konstrukcji modelu silosu	Napełnianie	Opróżnianie
Komora zewnętrzna	1789	1882
Komora wewnętrzna	1044	1020
Dno pierścieniowej komory	1810	1802

losu usytuowanym w pobliżu otworu wysypowego ($\alpha 0^\circ$) wartości tego ilorazu zmniejszyły się nawet do 0,17. W przekroju bocznym ($\alpha 14,5^\circ$) wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego znacznie wzrosły.

Na rysunku 6.15 przedstawiono wykresy globalnych obciążeń pionowych obydwu ścian oraz dna komory pierścieniowej. Z wykresów tych wynika, że przyrost obciążenia dna w początkowym okresie napełniania jest maksymalny. Wykres tego obciążenia w początkowej fazie jest zbliżony do prostej obrazującej teoretyczne obciążenia dna silosu bez uwzględnienia tarcia cukru o ścianę. Wraz z dalszym napełnieniem komory przyrosty obciążenia dna maleją i powyżej poziomu $z : H = 0,10$ są one praktycznie równe zero. Przeciwnie do przebiegu obciążenia dna na obydwu ścianach komór zawiesza się początkowo, dzięki siłom tarcia, niewielka ilość cukru. Napełnianie komory pierścieniowej powoduje szybkie zwiększenie przyrostów obciążeń ścian. Przyrosty te osiągają maksymalne wartości przy najwyższym poziomie napełnienia modelu silosu.

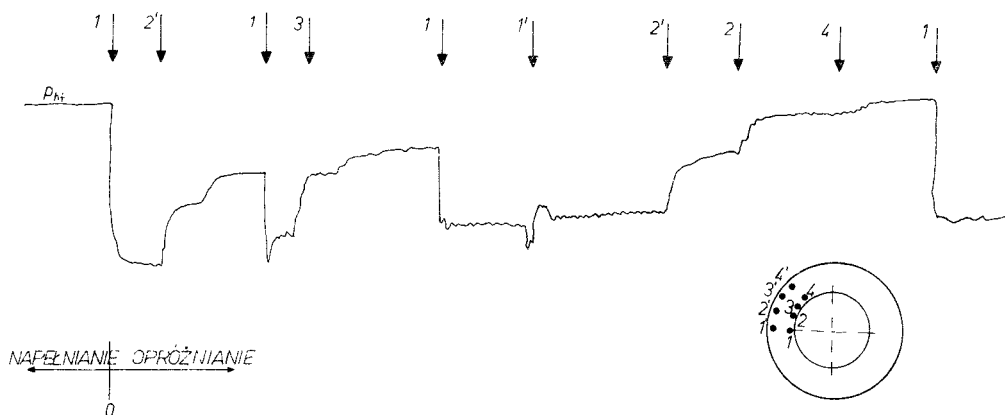
Pomierzone wartości globalnych obciążeń pionowych dna i ścian komory pierścieniowej w trakcie jej napełniania i opróżniania zestawiono w tab. 6.4.

W momencie rozpoczęcia opróżniania zarejestrowano niewielkie zmiany wartości obciążeń ścian i dna. Na ścianie zewnętrznej komory obciążenie pochodzące od sił tarcia nieznacznie wzrosło, a obciążenie ściany wewnętrznej oraz dna uległo małemu zmniejszeniu.

W praktyce opróżnianie komory pierścieniowej odbywa się najczęściej przez pobieranie materiału sypkiego niewielkimi porcjami przez otwory usytuowane w różnych miejscach dna silosu. Opróżnianie takie wywołuje powstawanie na ścianach komory zmiennych wartości naporu poziomego.

Na rysunku 6.16 przedstawiono fragment zapisu zmian naporu poziomego cukru w zależności od usytuowania otworu wysypowego względem czujnika. Na podstawie zapisu można stwierdzić, że każde przełączenie opróżniania z jednego otworu wysypowego na następny objawia się nagłą zmianą wartości obciążenia. W ten sposób w trakcie długotrwałej eksploatacji

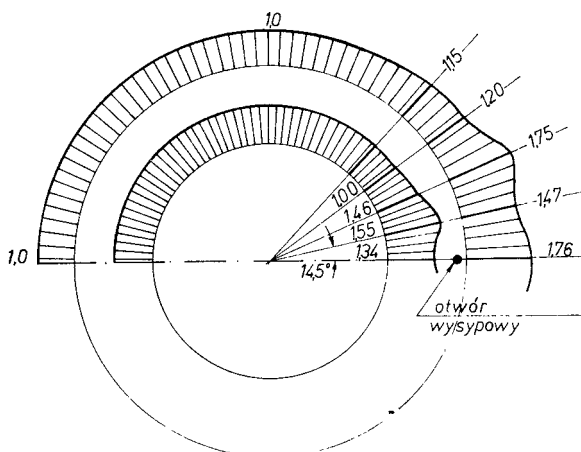
silosu zwiększona zostaje krotność zmian obciążeń. Wielokrotność zmian obciążeń może osiągnąć liczbę, która doprowadzi do zjawiska zmęczenia konstrukcji.



Rys.6.16. Zmiany naporu poziomego na ścianie wewnętrznego silosu w trakcie opróżniania przez otwory wysypowe usytuowane w różnych miejscach dna (poziom $z:H = 0,45$)

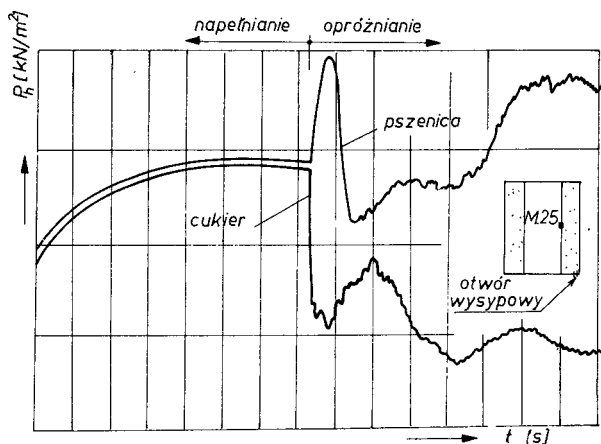
Fig.6.16. Variations of horizontal pressure on the internal silo wall during discharging through outlet gates located at different sites of the floor (level $z:H = 0,45$)

Drugim materiałem sypkim zastosowanym w badaniach była pszenica. Na podstawie pomiarów stwierdzono, że pszenica wywołuje wartości naporu znacznie różniące się od wartości naporu wywoływanego przez cukier. Obserwacje przepływu wykazały, że w komorze pierścieniowej stożkowy lej na powierzchni pszenicy pojawia się znacznie później aniżeli na powierzchni cukru. Obszar płynięcia pszenicy wykazywał znacznie większe wymiary, a ruch warstw powierzchniowych w kierunku otworu wysypowego był bardziej równomierny i następował jednocześnie z dwóch kierunków. Odmienne zachowywanie się pszenicy w trakcie opróżniania silosu spowodowało zmianę rozkładu naporu poziomego. W przekrojach pionowych po stronie wypływu w środkowej i górnej części silosu zarejestrowano duży wzrost wartości naporu. W dolnej części komór w przekrojach usytuowanych naprzeciw otworu wysypowego ($\approx 0^\circ$) wystąpiły spadki naporu, a w przekrojach bocznych ($\approx 14,5-29$ i $43,5^\circ$) zanotowano wzrost wielkości naporu poziomego. Duży zasięg wzrostów naporu poziomego wzdłuż obwodów komór potwierdza większy obszar płynięcia pszenicy aniżeli w modelu silosu wypełnionym cukrem. Przykład rozkładu naporu poziomego pszenicy w przekroju poziomym modelu silosu koncentrycznego przedstawiono na rys.6.17, na którym opisano wartości ilorazów naporu opróżniania i napełniania ($p_{ho} : p_{hm}$).



Rys. 6.17. Rozkład naporu poziomego pszenicy w przekroju poziomym silosu na głębokości $z:H = 0,45$ (na wykresach opisano wartości ilorazów naporu opróżniania i napełniania)

Fig. 6.17. Wheat horizontal pressure distribution across the transverse section of a silo at a depth of $z:H = 0,45$ (in the diagram the values of discharging-to-filling pressures ratio are given)



Rys. 6.18. Fragment zapisu zmian naporu poziomego dwóch różnych materiałów sypkich (poziom czujnika Nr 25 $z:H = 0,45$)

Fig. 6.18. A fragment of the recording of horizontal pressure exerted by two different bulk solids (level of No. 25 gauge $z:H = 0,45$)

Odmiennosc zachowywania się pszenicy w trakcie opróżniania komory pierścieniowej silosu potwierdzają także przedstawione na rys. 6.18 fragmenty zapisów zmian naporu poziomego w momencie rozpoczęcia opróżniania. Na poziomie czujnika nr 25 ($z : H = 0,45$) wystąpił nagły spadek wartości naporu poziomego cukru. W dalszej fazie opróżniania pojawiła się pulsa -

cja naporu. Maksymalne wartości naporu poziomego opróżniania nie były większe niż wartości pomierzone po napełnieniu silosu.

W badaniach pszenicy w tym samym punkcie pomiarowym zarejestrowano na początku krótkotrwały wzrost wartości naporu poziomego, po czym nastąpił jego spadek. W następnej fazie opróżniania zmiany naporu prowadziły ponownie do przekroczenia wartości naporu pomierzonego po napełnieniu komory.

6.3.3. Uogólnienie wyników badań eksperymentalnych

Na podstawie wyników pomiarów przyjęto następujące założenia do obliczeń:

1. Materiał sypki w stanie spoczynku znajduje się w czynno-plastycznym stanie naprężeń.
2. Rozpatrywany jest element materiału sypkiego grubości dz wycięty na głębokości z .
3. Rozkład naporu pionowego działającego na wycięty element nie zmienia się w przekroju komory, tzn.:

$$\frac{dp_v}{dz} = 0.$$

4. W rozpatrywanej komorze pierścieniowej występują różnice w wartościach naporu na ścianie zewnętrznej i wewnętrznej, tzn.

$$p_{hz} = \frac{1}{\Omega} p_{hw},$$

gdzie Ω - parametr rozkładu naporu poziomego w przekroju komory silosu.

5. Ilorazy naporu poziomego i pionowego przy obydwu ścianach komory pierścieniowej związane są następującą zależnością:

$$\frac{p_{hz}}{p_v} = \frac{p_{hw}}{\Omega \cdot p_v},$$

gdzie

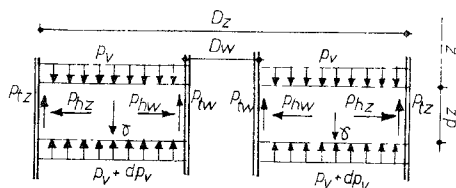
indeksy z oraz w oznaczają ścianę zewnętrzną i wewnętrzną, parametr Ω wynika z założenia 4.

Układ sił działających na rozpatrywany element materiału sypkiego w komorze pierścieniowej przedstawiono na rys. 6.19.

Warunek równowagi sił pionowych

$$F p_v + \gamma F dz = F (p_v + dp_v) + p_{tz} U_z dz + p_{tw} U_w dz. \quad (6.1)$$

Przyjawszy, że:



Rys.6.19. Układ sił działających na elementarny pierścień materiału sypkiego wycięty w komorze silosu koncentrycznego
 Fig.6.19. Forces acting on the elementary "slice" of a bulk solid cut out from the chamber of a concentric silo

$$\frac{p_{tw}}{p_{hw}} = \frac{p_{tz}}{p_{hz}} = \operatorname{tg} \phi_s \quad (6.2)$$

oraz

$$k = \frac{p_{hz}}{p_v} = \frac{p_{hw}}{\Omega p_v} \quad (6.3)$$

otrzymamy następujące równanie różniczkowe:

$$F dp_v = (\gamma F - \operatorname{tg} \phi_s k p_v U_z - \operatorname{tg} \phi_s \Omega k p_v U_w) dz, \quad (6.4)$$

skąd

$$dz = \frac{F dp_v}{\gamma F - k p_v U_z \operatorname{tg} \phi_s - \Omega k p_v U_w \operatorname{tg} \phi_s}. \quad (6.5)$$

Po oznaczeniu dodatkowo ilorazu

$$\frac{F}{U_z} = r_{hz} \quad (6.6)$$

w wyniku rozwiązania równania (6.5) otrzymamy:

$$p_v = \frac{\gamma r_{hz}}{k \operatorname{tg} \phi_s} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U_w}{U_z}} \eta, \quad (6.7)$$

wówczas

$$p_{hz} = \frac{\gamma r_{hz}}{\operatorname{tg} \phi_s} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U_w}{U_z}} \eta \quad (6.8)$$

$$p_{hw} = \frac{\gamma r_{hz}}{\operatorname{tg} \phi_s} \frac{\Omega}{1 + \Omega \frac{U_w}{U_z}} \eta \quad (6.9)$$

oraz

$$p_{tz} = \gamma r_{hz} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}} \eta \quad (6.10)$$

$$p_{tw} = \gamma r_{hz} \frac{\Omega}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}} \eta, \\ - \frac{k \operatorname{tg} \phi_s}{r_{hz}} \left(1 + \Omega \frac{U^w}{U_z} \right) z$$

gdzie $\eta = 1 - e$ (6.11)

Wartości naporu na nieskończonej głębokości wynoszą:

$$\max p_v = \frac{\gamma r_{hz}}{k \operatorname{tg} \phi_s} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}}, \quad (6.12)$$

$$\max p_{hz} = \frac{\gamma r_{hz}}{\operatorname{tg} \phi_s} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}}, \quad (6.13)$$

$$\max p_{hw} = \frac{\gamma r_{hz}}{\operatorname{tg} \phi_s} \frac{\Omega}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}}, \quad (6.14)$$

$$\max p_{tz} = \gamma r_{hz} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}}, \quad (6.15)$$

$$\max p_{tw} = \gamma r_{hz} \frac{\Omega}{1 + \Omega \frac{U^w}{U_z}}. \quad (6.16)$$

Parametr Ω można wyznaczyć na podstawie wyników opisanych badań.

Wykres tego parametru zilustrowano na rys. 6.20.

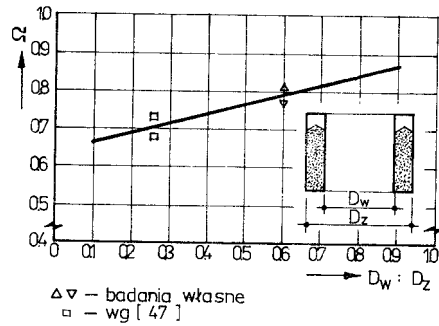
Przedstawioną na rys. 6.20 zależność można opisać następująco:

$$\Omega = 0,65 + 0,25 \frac{D^w}{D_z}. \quad (6.17)$$

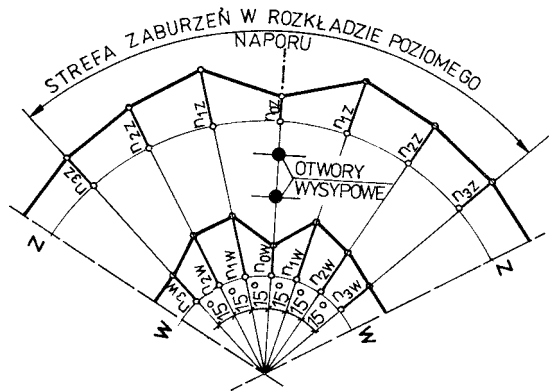
Iloraz naporu poziomego i pionowego można przyjąć zgodnie z wynikami badań własnych (rys. 6.12, wykres k_z) w postaci następującej funkcji:

$$k = 1 - \sin \phi_u. \quad (6.18)$$

Wzory (6.7)-(6.11) będą ważne również dla stanu opróżnianego silosu koncentrycznego z wyjątkiem strefy zaburzeń w rozkładzie naporu poziomego, występującej po stronie wypływu materiału sypkiego.



Rys.6.20. Wykres parametru Q
 Fig.6.20 Parameter Q



Rys.6.21. Schemat rozkładu współczynników zmiany naporu poziomego w silosie koncentrycznym (z - ściana zewnętrzna, w - ściana wewnętrzna)

Fig.6.21. The distribution of the coefficient of horizontal pressure variation in a concentric silo (z - external wall, w - internal wall)

T a b e l a 6.5

Wartości współczynników zmiany naporu w pierścieniowej komorze silosu koncentrycznego

Materiał sypki	Wartości współczynników n_{iz} oraz n_{iw}							
	komora zewnętrzna				komora wewnętrzna			
	n_{oz}	n_{1z}	n_{2z}	n_{3z}	n_{ow}	n_{1w}	n_{2w}	n_{3w}
cukier	0,75	1,10	1,05	1,00	0,41	1,28	1,10	1,00
pszenica	1,50	1,40	1,15	1,10	1,20	1,50	1,40	1,00

Wartości naporu poziomego w tej strefie można obliczyć ze wzorów:

$$p_{hoz} = n_{iz} \frac{r_{hz}}{\operatorname{tg} \phi_s} \frac{1}{1 + \Omega \frac{U_w}{U_z}} \eta, \quad (6.19)$$

$$p_{how} = n_{iw} \frac{r_{hz}}{\operatorname{tg} \phi_s} \frac{\Omega}{1 + \Omega \frac{U_w}{U_z}} \eta, \quad (6.20)$$

$$\text{gdzie } \eta = 1 - e^{-\frac{k \operatorname{tg} \phi_s}{r_{hz}} \left(1 + \Omega \frac{U_w}{U_z}\right) z},$$

przy czym

n_{iz} - współczynnik zmiany naporu poziomego na i-tym punkcie obwodu komory zewnętrznej,

n_{iw} - współczynnik zmiany naporu poziomego na i-tym punkcie obwodu komory wewnętrznej.

Oznaczenia współczynników n_{iz} i n_{iw} oraz ich rozkład wzdłuż obwodów komory pierścieniowej silosu przedstawiono na rys.6.21.

Wartości współczynników n_{iz} i n_{iw} wyznaczono na podstawie opisanych badań własnych i zestawiono w tab. 6.5.

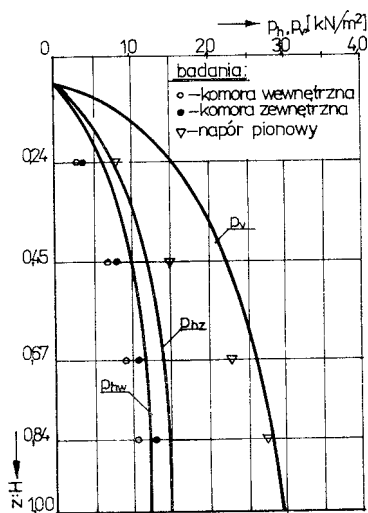
6.3.4. Porównanie rozwiązania teoretycznego z wynikami badań eksperymentalnych

Dla porównania przyjęto model silosu wypełniony cukrem, którego wartości cech fizyko-mechanicznych wynoszą: $\gamma = 8,18 \text{ kN/m}^3$, $\phi_u = 30^\circ$, $\operatorname{tg} \phi_s = 0,55$. Geometryczne wymiary modelu przyjęto według rys.6.4.

T a b e l a 6.6

Wyniki teoretycznych obliczeń naporu cukru po napełnieniu pierścieniowej komory modelu silosu

Poziom z (m)	Wartości naporu (kN/m^2)		
	ściana komory zewnętrznej	ściana komory wewnętrznej	napór pionowy
	p_{hz}	p_{hw}	p_v
0,24	0,74	0,59	1,48
1,45	1,11	0,88	2,22
0,67	1,34	1,07	2,68
0,84	1,44	1,15	2,88
1,00	1,49	1,19	2,98



Obliczono następujące wartości pomocnicze:

- iloraz naporu poziomego i pionowego:

$$k = 1 - \sin \phi_u = 0,50$$

- hydrauliczny promień komory pierścieniowej r_{hz} :

$$r_{hz} = \frac{F}{U_z} = \frac{0,538}{3,27} = 0,164$$

Rys.6.22. Porównanie wartości naporu wyznaczonych teoretycznie z wynikami badań modelowych (stan napełniania silosu)

Fig.6.22. Theoretically calculated pressures vs. model studies results (filling)

- parametr Ω

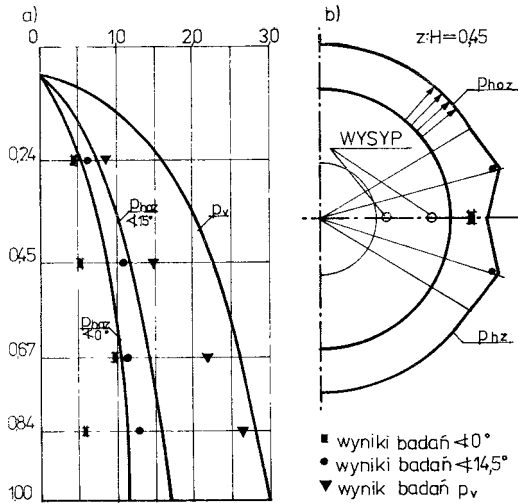
$$\Omega = 0,65 + 0,25 \frac{D}{D_z} = 0,65 + 0,30 \frac{630}{1040} = 0,80.$$

T a b e l a 6.7

Wyniki obliczeń wartości naporu w strefie zaburzeń powstającej w trakcie opróżniania komory pierścieniowej

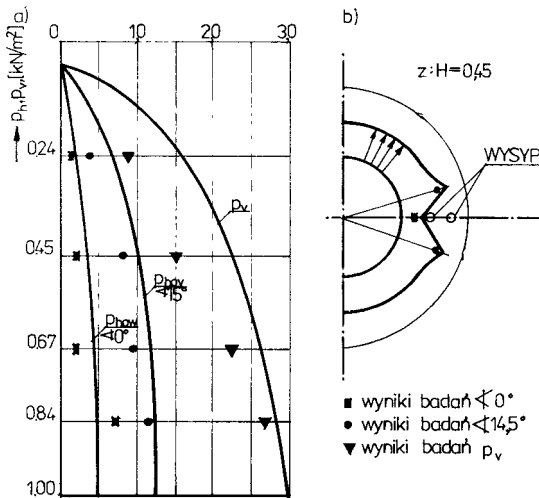
Komora	Zewnętrzna			Wewnętrzna		
Kąt odchylenia przekroju od płaszczyzny otworu wysypowego	0°	15°	30°	0°	15°	30°
Oznaczenie współczynnika i jego wartość	n_{0z} 0,85	n_{1z} 1,10	n_{2z} 1,05	n_{0w} 0,41	n_{1w} 1,28	n_{2w} 1,10
Wartości naporu, kN/m ²						
z : H = 0,24	0,55	0,81	0,78	0,24	0,75	0,65
z : H = 0,45	0,83	1,22	1,16	0,36	1,13	0,97
z : H = 0,67	1,05	1,47	1,41	0,44	1,37	1,18
z : H = 0,84	1,08	1,58	1,51	0,47	1,47	1,26
z : H = 1,00	1,12	1,64	1,56	0,49	1,52	1,31

Wartości poziomego i pionowego naporu cukru obliczone z wzorów (6.7) do (6.8) zestawiono w tab.6.5, a ich porównanie z wynikami badań ilustruje rys.6.22.



Rys.6.23. Porównanie wyników obliczeń w strefie zaburzeń w rozkładzie naporu poziomego z wynikami badań modelowych (stan opróżniania, komora zewnętrzna)

Fig.6.23. The comparison of calculation results for horizontal pressures in the disturbance (turbulent?) zone with model studies results (discharging, external chamber)



Rys. 6.24. Porównanie wyników obliczeń w strefie zaburzeń w rozkładzie naporu poziomego z wynikami badań modelowych (stan opróżniania, komora wewnętrzna)

Fig.6.24. The comparison of calculation results for horizontal pressures in the disturbance zone with model studies results (discharging, internal chamber)

Wpływ zaburzeń w rozkładzie naporu poziomego w trakcie opróżniania komory pierścieniowej uwzględniamy stosując do wzorów (6.19) i (6.20) współczynniki zamieszczone w tab. 6.5.

Obliczone wartości naporu poziomego po stronie wypływu zamieszczono w tab. 6.7. Porównanie wykresów naporu z wynikami badań doświadczalnych zawierają rys. 6.23 i 6.24.

Z rysunków 6.22-6.24 wynika, że zaproponowany sposób obliczeń wystarczająco dobrze odzwierciedla rozkład naporu wyznaczony doświadczalnie. Szczególnie duża zgodność występuje w najniższych strefach komory, w której występują maksymalne obciążenia ścian silosu.

6.4. Wnioski

Przedstawione badania umożliwiły określenie rozkładu i wartości naporu dwóch różnych materiałów sypkich w silosie typu koncentrycznego. Uzyskane wyniki badań pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

1. W trakcie opróżniania komory pierścieniowej silosu koncentrycznego na ścianach obydwu komór (zewnętrznej i wewnętrznej) powstaje nierównomierny rozkład naporu poziomego.

2. Wartości i rozkład naporu poziomego zależą od usytuowania otworu wysypowego.

3. W trakcie opróżniania silosu przez otwór wysypowy znajdujący się przy ścianie zewnętrznej występują maksymalne wartości naporu poziomego działającego na ściany komory wewnętrznej. Opróżnianie przez otwór usytuowany przy ścianie wewnętrznej wywołuje na tej ścianie największe spadki wartości naporu poziomego.

4. Największa nierównomierność rozkładu naporu poziomego w komorze pierścieniowej występuje na ścianach komory wewnętrznej.

5. Na obydwu ścianach komór, po stronie otworu wysypowego, zmiany naporu poziomego mają charakter pulsacyjny. Pulsacja naporu wywołana zostaje przez warstwowe obsuwanie się materiału sypkiego w kierunku otworu wysypowego.

6. Po napełnieniu komory pierścieniowej, wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego wyznaczone dla komory wewnętrznej są mniejsze niż wartości obliczone dla komory zewnętrznej.

7. Proces opróżniania pogłębia istniejące różnice w wartościach ilorazów naporu poziomego i pionowego, wyznaczonych na ścianach obydwu komór.

8. W trakcie opróżniania komory pierścieniowej badanego silosu zarejestrowano nieznaczne zmiany globalnych obciążeń działających na dno i ściany. Na ścianie zewnętrznej komory obciążenie pochodzące od sił tarcia wzrosło, natomiast obciążenie ściany wewnętrznej oraz dna zmniejszyło się.

9. Zastosowanie dwóch różnych materiałów sypkich (cukier i pszenica) wykazało istnienie znacznych różnic w wartościach ich oddziaływań w trakcie opróżniania silosu.

7. WPLYW ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH MATERIAŁU SYPKIEGO NA NIEZAWODNOŚĆ KONSTRUKCYJNĄ SIŁOSÓW ŻELBETOWYCH

7.1. Wstęp

Pojawiające się w praktyce awarie konstrukcji silosów narzucają potrzebę prowadzenia intensywnych badań, których celem jest udoskonalenie stosowanych obecnie metod projektowania. Jednym z ważnych problemów jest zagadnienie dynamicznych zmian naporu materiału sypkiego oraz ich wpływ na pracę konstrukcji silosów. Większość zrealizowanych dotychczas badań eksperymentalnych wykazała występowanie pulsacji naporu. Amplituda tej pulsacji w niektórych przypadkach może przybierać znaczące wartości.

W wielu pracach stwierdza się również powstawanie dużych nierównomierności rozkładu naporu poziomego wzdłuż obwodu komory. W trakcie opróżniania silosu w rozkładzie naporu zachodzą zmiany, które wywołują falowe zmiany wartości równoleżnikowych momentów zginających. Obserwuje się nawet przypadki zmiany znaku momentu zginającego na przeciwny.

Badania wykazały, że w konstrukcjach żelbetowych obciążenia w niewielkim cyklu powtórzeń powodują już negatywne skutki w jej wytrzymałości i wytrzymałości.

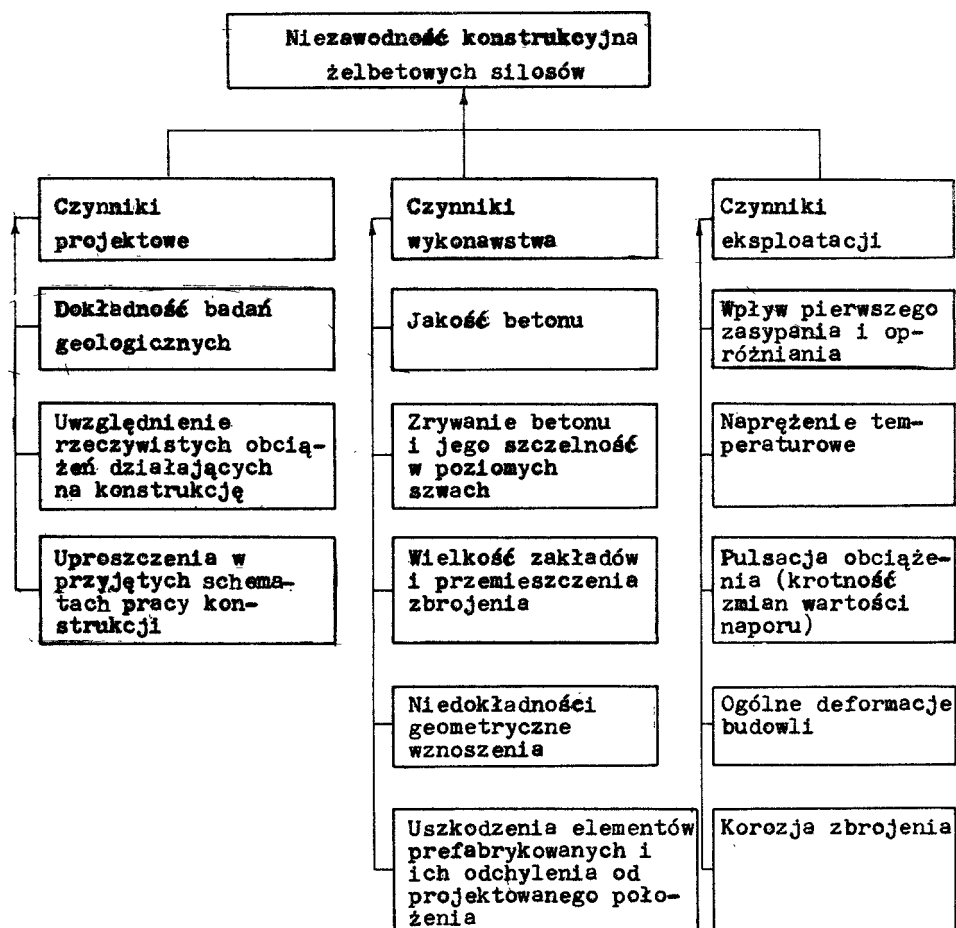
Wpływ obciążeń dynamicznych jest obecnie pomijany w wytrzymałościowych obliczeniach silosów. Obserwacje wykonanych obiektów natomiast bardzo często wykazują, że już po 3-6 latach eksploatacji silosów żelbetowych pojawiają się w ich ścianach rysy, których szerokość rozwarcia przekracza wielkości dopuszczalne normami. Wskutek eksploatacji rozwartość tych rys powiększa się i doprowadza z biegiem czasu do znacznych uszkodzeń ścian.

7.2. Czynniki decydujące o niezawodności konstrukcyjnej silosów

Niezawodność konstrukcyjną silosów można określić następującą funkcją:

$$N_k = f(N_{kp}, N_{kt}, N_{ke}, T_e), \quad (7.1)$$

gdzie



Rys.7.1. Schematyczne przedstawienie czynników wpływających na niezawodność konstrukcyjną silosów

Fig.7.1. Factors affecting the structural reliability of silos

- N_{kp} - projektowana charakterystyka niezawodności konstrukcji zależna od dokładności metod obliczeń i rozwiązań konstrukcyjnych,
- N_{kt} - technologiczna charakterystyka niezawodności konstrukcji zależna od procesu realizacji obiektu,
- N_{ke} - eksploatacyjna charakterystyka niezawodności konstrukcji zależna od stopnia działania czynników klimatycznych i eksploatacyjnych, jakości zabezpieczeń ochronnych, okresów bieżących konserwacji i remontów oraz od warunków technicznej eksploatacji obiektu.
- T_0 - czas eksploatacji konstrukcji (kres jej technicznej służby).

Każda z charakterystyk stanowiąca funkcję niezawodności zależy od wielu czynników niejednokrotnie przypadkowych, które powinny być określone na podstawie statystycznych danych doświadczalnych. Czynniki te z podziałem na grupy w sposób graficzny przedstawiono na rys. 7.1.

Często przedmiotem badań są czynniki związane z obciążeniami pochodzącymi od materiału sypkiego. Obciążenia te wykazują wiele właściwości wpływających na eksploatacyjne wskaźniki silosów. Zalicza się do nich długotrwałość obciążeń określoną okresem magazynowania materiału sypkiego. Jednocześnie w okresie tym występują zmiany obciążeń. Związane jest to z pełnym lub częściowym opróżnianiem silosów oraz ich częściowym lub pełnym dopełnianiem. W trakcie opróżniania silosów pojawia się pulsacja naporu, której amplituda i częstotliwość mogą zmieniać się w dużych przedziałach. Nagła zmiana wartości naporu w momencie rozpoczęcia opróżniania silosu oraz jego pulsowanie w okresie późniejszym kwalifikuje obciążenia materiałem sypkim do obciążeń dynamicznych.

W wielu badaniach udowodniono nierównomierność rozkładu naporu materiału sypkiego, która szczególnie nasila się podczas opróżniania niesymetrycznego silosu. Nierównomierność rozkładu naporu wprowadza określone konsekwencje w obliczaniu sił wewnętrznych. Wbrew dotychczasowym przepisom normowym, np. w cylindrycznych silosach wolno stojących, należałoby podczas wymiarowania ścian uwzględniać występowanie równoleżnikowych momentów zginających.

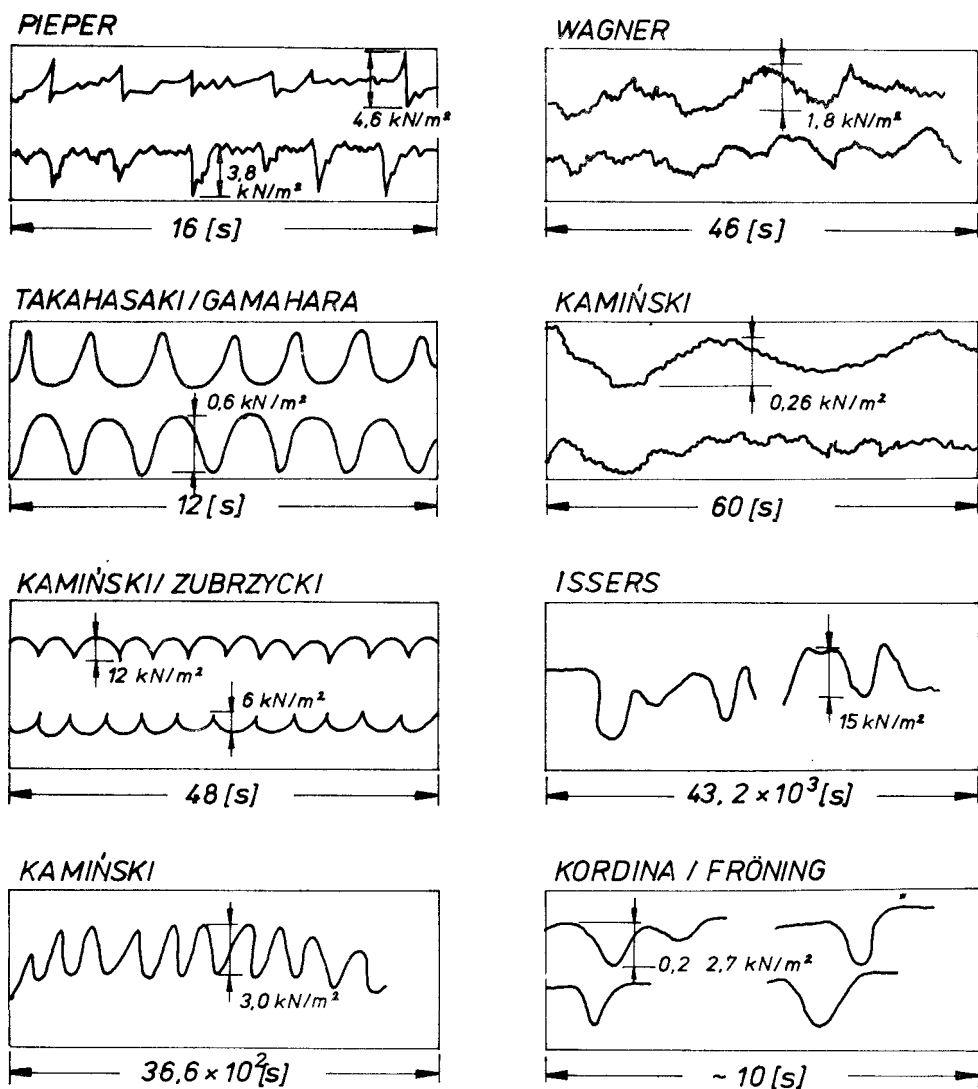
Zarówno pulsacja naporu, jak i nierównomierność jego rozkładu, pomimo iż bywają najczęściej główną przyczyną uszkodzenia ścian silosów, nie są jeszcze w sposób zadowalający uwzględniane w praktyce projektowej.

7.3. Badania zmian dynamicznych naporu i odkształceń ścian w silosach

7.3.1. Pulsacja naporu

Na podstawie wyników badań najczęściej sądzi się, że pulsacja naporu materiału sypkiego w silosach powstaje w wyniku periodycznie powstających i niszczących się sklepień. Inną przyczynę pulsacji upatruje się też w cyklicznych zagęszczeniach i rozluźnieniach materiału sypkiego w silosie, które związane są ze zmianą pól prędkości oraz pól naprężeń występujących niesymetrycznie względem osi komory. Zmiany tych pól wywołane są wewnętrznymi przyczynami i procesem wypływu materiału sypkiego z silosu.

Pulsacja naporu pojawia się w niedługim czasie po rozpoczęciu opróżniania silosu, a kończy się po opróżnieniu około 2/3 pojemności komory. Częstotliwość zmian naporu wynosi od 0,007 do 0,59 Hz, amplituda zaś od 5 do 20% średnich wartości naporu. W silosach w skali naturalnej



Rys.7.2. Schematy wybranych typów pulsacji naporu zarejestrowanej w trakcie opróżniania silosów

Fig.7.2. Selected types of pressure fluctuations recorded during discharging of a silo

rejestruje się również zmiany naporu, których wartość amplitudy przewyższa o 100% średnie wartości naporu, zaś częstotliwość tych zmian wynosi około $0,002 \text{ Hz}$. W niektórych badaniach stwierdzono również występowanie pulsacji o niewielkiej amplitudzie w trakcie napełniania silosu.

Charakter przebiegu zmian naporu w trakcie opróżniania silosu bywa różny i zależy od wielkości komory, miejsca usytuowania czujnika, a tak-

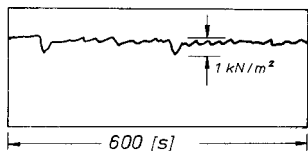
T a b e l a 7.1

Wartości okresu i amplitudy pulsacji naporu materiału sypkiego
podczas opróżniania

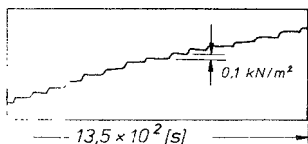
Autor	Obiekt		Materiał sypki	Wartości okresu i amplitudy	
	skala natu- ralna	model		okres	max p_{ho} :min p_{ho}
Takahaski Gamahara [154]	x		zboże	0,20-0,50	0,9
Pieper i in. [119]			klinkier	0,30-0,50	0,50-0,9
Wagner [160]		x	cemen- towy		
Wagner [160]		x	piasek	0,06-0,08	0,6-0,7
Platonov [133]	x		zboże	0,10-0,20	-
Berdičevskij i in. [5]	x		zboże	0,007-0,03	0,08-0,9
Nothdurft [109]	x		kuku- rydza	-	0,08-0,9
Kordina Fränning [82]	x		zboże	0,20-0,59	0,9-0,99
Frese [34]		x	piasek	0,20-0,50	0,4
Kamiński Zubrzycki [64]	x		psze- nica	0,17-0,23	0,5-0,9
Kamiński [66]		x	psze- nica	0,02-0,10	0,77-0,90
Kamiński [67]		x	cukier	0,03-0,50	0,8

x oznacza badany obiekt.

TAKAHASAKI / GAMAHARA



KAMIŃSKI



że od rodzaju materiału sypkiego. Przykładowe typy pulsacji przedstawiono na rys. 7.2 (opróżnianie) oraz na rys. 7.3 (napełnianie). W tabeli 7.1 zestawiono na podstawie różnych badań wartości częstotliwości pulsacji oraz wartości ilorazu minimalnego i maksymalnego naporu poziomego opróżniania.

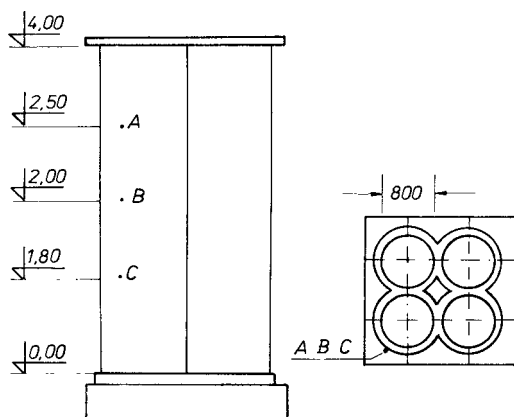
Występowanie pulsacji naporu wiąże się ściśle z obrazem przepływu materiału sypkiego.

Rys.7.3. Przebieg zmian naporu poziomego
podczas napełniania silosu
Fig.7.3. Horizontal pressure variations
during filling

go w silosach. Na podstawie analizy wyników badań obiektów w skali naturalnej Kuročkin [85] stwierdził, że maksymalne wahania cykliczne wartości naporu występują w przyściennych słojach materiału sypkiego. W kierunku do środka rdzenia przepływu wartości amplitudy pulsacji szybko znikają. W silosach z gładkimi ścianami w odległości $> 0,1 D$ pulsacja naporu już nie występuje. W silosach ze ścianami uźebrowanymi w zębra pierścieniowe (np. silos "noworosyjskij") pulsacja naporu występowała w niektórych przypadkach jeszcze w odległości $0,2 D$ od ściany silosu (D - średnica komory).

7.3.2. Pomiary odkształceń i naprężeń w zbrojeniu silosów

Eksperymentalne badania odkształceń ścian silosów wykazały, że odkształcenia te zmieniają się nie tylko co do wartości, lecz również co do znaku. Ocenia się, że podczas mikropulsacji zmiana naporu o ok. 5% wywołuje zmiany odkształceń ścian od 10 do 15% ich średnich wartości. Podczas makropulsacji natomiast zmiana naporu od 20 do 30% wywołuje zmiany odkształceń w granicach od 40 do 70%.

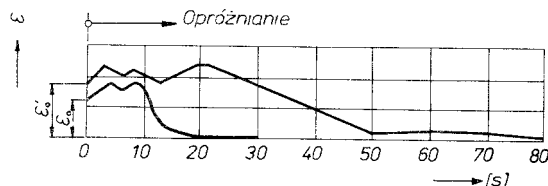


Rys.7.4. Schemat modelu baterii silosów zastosowanego w badaniach Pankratowej [115]
Fig.7.4. The model of the battery of silos used in the studies by Pankratow [115]

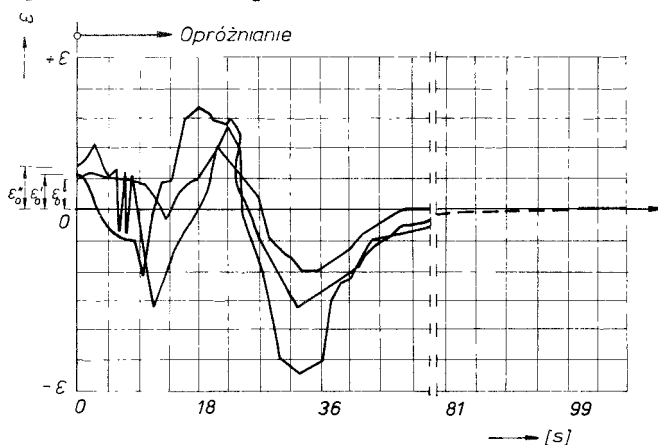
Badania obejmujące pomiary odkształceń ścian wykonała m.in. Pankratowa [115]. Badania te prowadziła na modelu zblokowanych czterech komór silosów w skali $1 : 7,5$. Średnica komór wynosiła $0,8 \text{ m}$, wysokość zaś $4,0 \text{ m}$ (rys. 7.4).

Model silosu zasypywano materiałem sypkim równomiernie na całej powierzchni przekroju komór. Odkształcenia mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych, które naklejało w różnych punktach komory. Przez

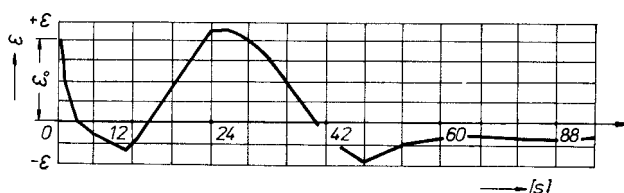
odpowiednie połączenie tensometrów możliwe było rozdzielanie wpływów pierścieniowej siły rozciągającej oraz momentu zginającego.



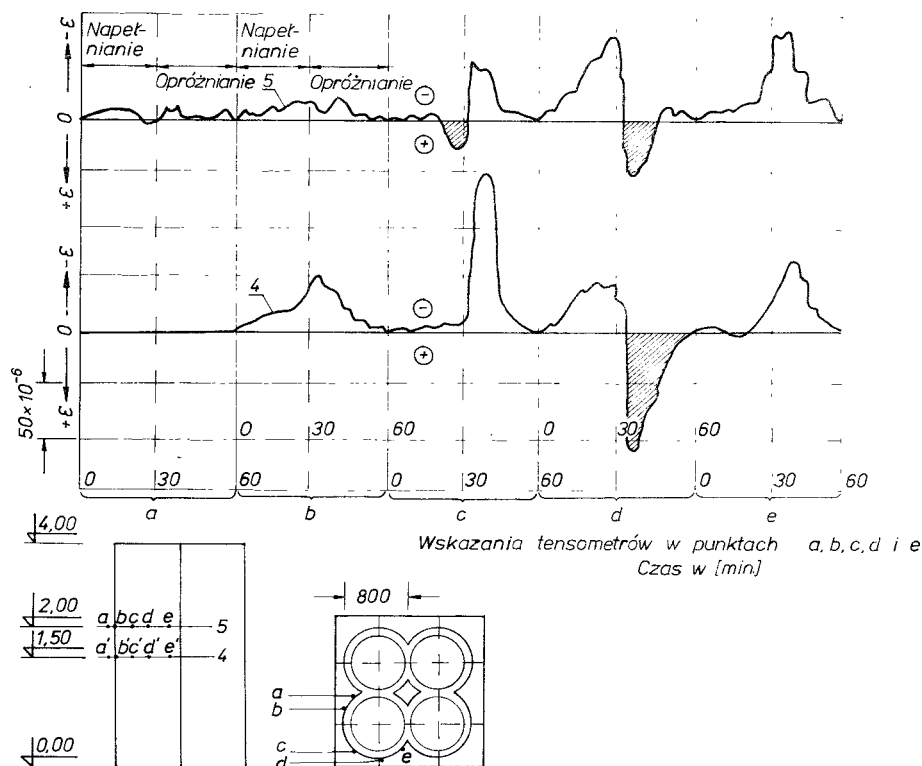
Rys.7.5. Zmiana odkształceń ścian modelu silosu w punkcie B (rys.7.4) wywołana działaniem równoleżnikowej siły rozciągającej N [115]
Fig.7.5. Strain variation in the wall of a model silo measured at point B (fig.7.4) due to a parallel-of-latitude tensile force N [115]



Rys.7.6. Wykres zmian odkształceń ściany silosu w punkcie B w wyniku działania momentu zginającego podczas opróżniania modelu silosu [115]
Fig.7.6. Strain variation in the wall of a silo measured at point B due to the bending moment during discharge [115]



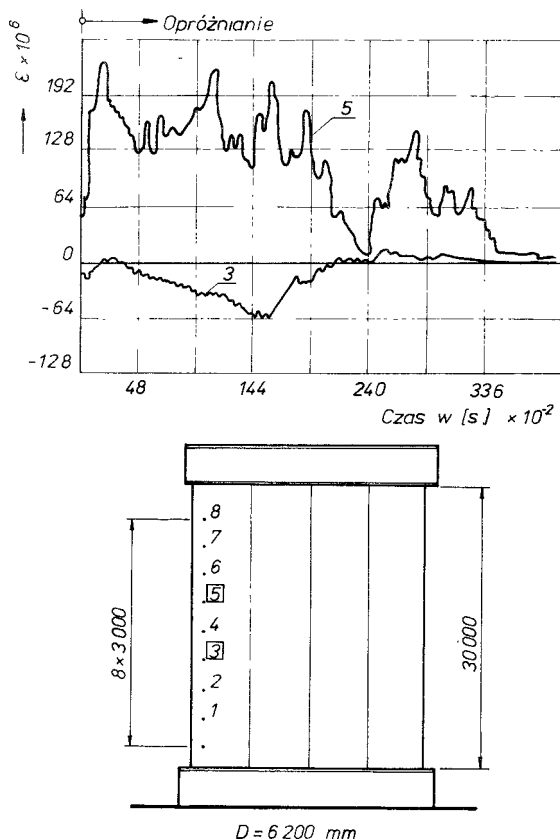
Rys.7.7. Wykres zmian odkształceń zewnętrznych włókien ściany modelu w punkcie B w trakcie cyklu jednoczesnego napełnienia i opróżniania [115]
Fig.7.7. Strain variation in the external wall fibres measured at point B during the cycle of a simultaneous filling and discharging [115]



Rys.7.8. Wykresy względnych odkształceń zewnętrznych włókien ściany w przekroju poziomym modelu silosu Pankratowej [85]

Fig.7.8. Relative strains of external wall fibres measured in the cross-section of the Pankratova model silo [85]

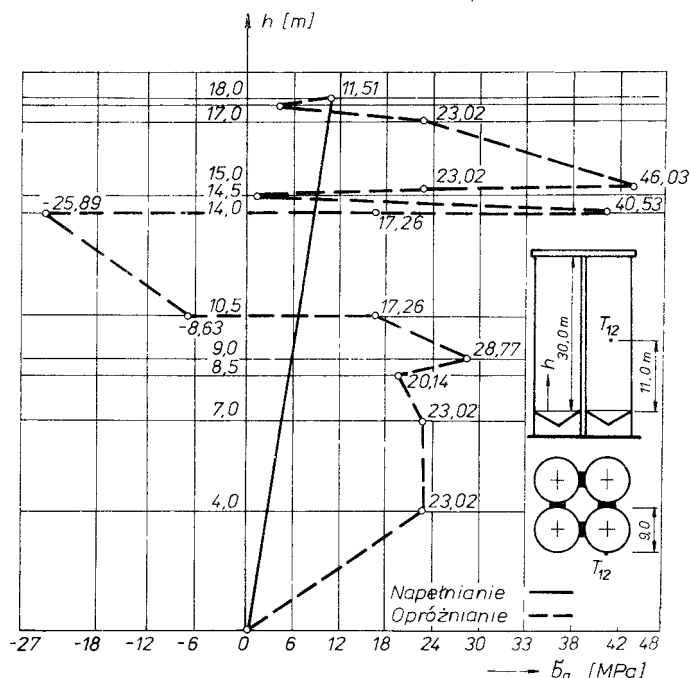
Pankratowa wykazała, że w dolnej części silosu (punkt A, rys.7.4) podczas opróżniania komory wartości odkształceń ściany zmieniają się płynnie (prawie liniowo) bez zmiany znaku. W wyższych strefach komory (punkty B i C) odkształcenia wywołane siłą pierścieniową zmieniają w czasie jedynie swoją wartość (rys. 7.5). Zmiana odkształceń od momentu zginającego przebiega natomiast w sposób cykliczny zarówno pod względem wartości, jak i znaku. Na rysunku 7.6 przedstawiono wykresy zmian odkształceń zewnętrznych włókien ściany pod wpływem momentu zginającego, uzyskane z trzech różnych pomiarów. Z rysunku tego wynika, że wartość amplitudy odkształceń od zginania zwiększa się w miarę poboru materiału sypkiego o około 3-5 razy w porównaniu do wartości odkształceń pomierzonych po napełnieniu silosu. Okres pulsacji odkształceń wynosi 12-20 s. W trakcie jednoczesnego napełniania i opróżniania komory modelu silosu maksymalna amplituda wystąpiła w pierwszej fazie tego procesu (rys.7.7). Zwiększenie prędkości opróżniania prowadziło do zmniejszenia okresu pulsacji.



Rys.7.9. Pulsacja odkształceń w wyniku zginania ściany silosu w skali naturalnej podczas cyklu opróżniania [85]
 Fig.7.9. Pressure fluctuations due to the bending of the wall of a full-size silo during discharging [85]

Na rysunkach 7.5-7.7 nie naniesiono wielkości wydłużeń pomierzonych w płaszczu modelu silosu (brak danych w literaturze źródłowej), stąd przedstawione na nich wykresy mogą jedynie w sposób jakościowy ilustrować przebieg opróżniania. Stanowią one jednak dowód na to, że wydłużenia ścian komory silosu, a zatem również wartości naprężeń w procesie opróżniania, zmieniają swój znak na przeciwny. Wydłużenia ϵ_0 , ϵ'_0 i $\tilde{\epsilon}_0$ zarejestrowano w trakcie tych pomiarów po napełnieniu modelu silosu bezpośrednio przed rozpoczęciem opróżniania.

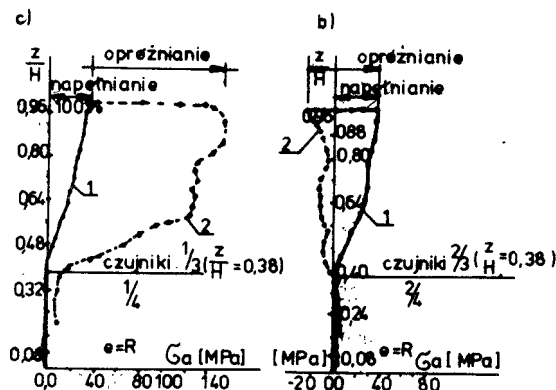
W pracy [66] przedstawiono wyniki badań Pankratowej prowadzone również na opisanym modelu silosu. Badania te obejmowały pomiar odkształceń zewnętrznych włókien ściany w kilku punktach rozmieszczonych wzdłuż obwodu przekroju poziomego komory silosu. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.7.8.



Rys.7.10. Wykres zmian wartości naprężeń w zbrojeniu ściany silosu w skali naturalnej według badań Kamińskiego i Zubrzyckiego [57]
 Fig.7.10. Changes of strain values in the reinforcing elements of the wall of a full-size silo according to the studies by Kamiński and Zubrzycki [70]

Rysunek ten ilustruje zmiany wydłużeń pomierzonych w punktach a-e w trakcie napełniania i opróżniania badanej komory silosu. Napełnianie i opróżnianie trwało łącznie 60 min. Najmniejsze zmiany wydłużeń wystąpiły w okolicach węzłów komór w punktach a oraz b. W środkowej części łuku komory (punkty c oraz d) wydłużenia zewnętrznych włókien ściany osiągnęły przy różnych znakach swoje wartości maksymalne. Pankratowa prowadziła również pomiary wydłużeń zewnętrznych włókien ściany silosu w skali naturalnej. Wyniki tych badań potwierdziły występowanie znacznych zmian wydłużeń w środkowej strefie komory (rys.7.9). W punkcie 3 wydłużenia mierzone w trakcie opróżniania zmieniły znak na przeciwny. W punkcie 5 natomiast przebieg wydłużeń charakteryzował się nagłymi zmianami wartości bez zmiany znaku.

Kamiński i Zubrzycki [70] wykonali pomiary odkształceń zbrojenia ścian komór baterii silosów o średnicy $D = 9,0$ m. Pomiarów dokonano przez nakleśnięcie elektrooporowych tensometrów na zewnętrznym i wewnętrznym równoleżnikowym zbrojeniu ścian. W niektórych przypadkach stwierdzono zmiany odkształceń zarówno co do wartości, jak i znaku. Na rysunku 7.10



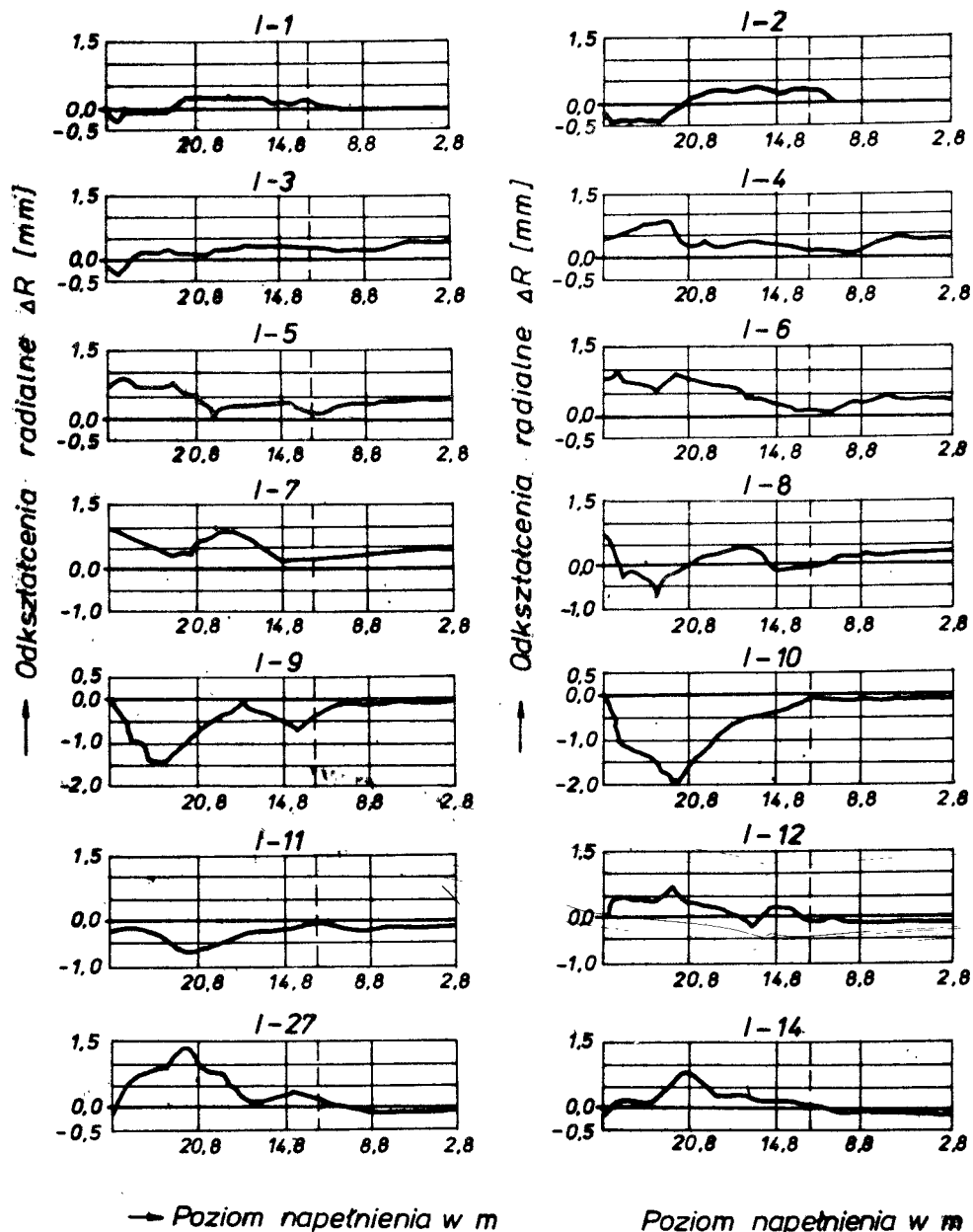
Rys.7.11. Wykresy zmiany naprężeń w zbrojeniu silosu w skali naturalnej według badań Łapki i Stachurskiego [93] (1 - napełnianie, 2 - opróżnianie)
 Fig.7.11. changes of strain in the reinforcing elements of a full-size silo according to the studies by Łapko and Stachurski [93]:
 1 - filling, 2 - discharging

przedstawiono przykładowo wybrany wykres zmian naprężeń w zbrojeniu ściany badanej komory silosu.

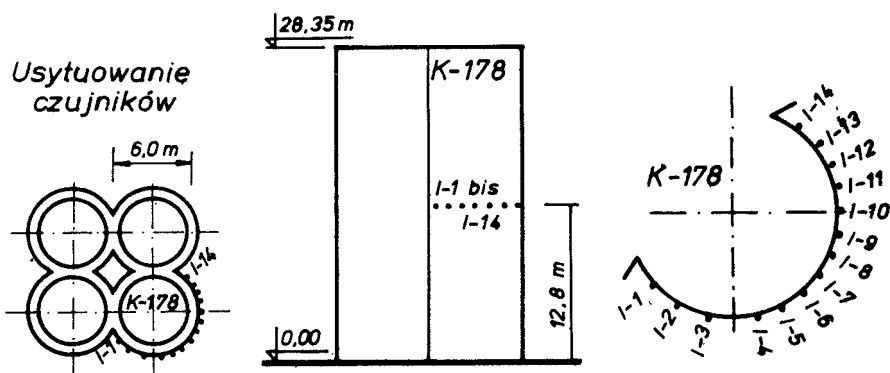
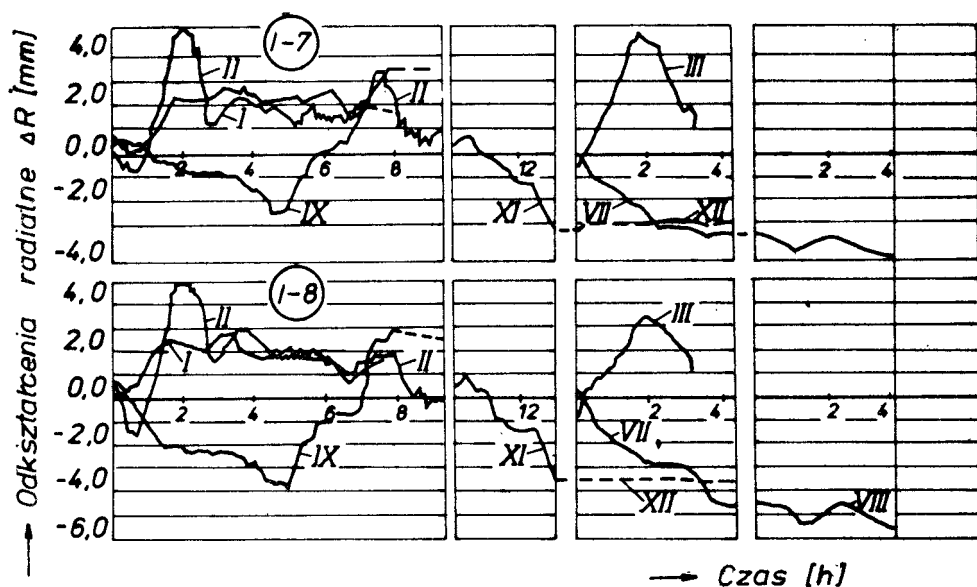
Z przedstawionego na rys. 7.10 wykresu wynika, że podczas napełniania komory wartości naprężeń w zbrojeniu wzrastały liniowo, osiągając maksymalne wartości o znaku dodatnim (rozciąganie). W trakcie opróżniania natomiast zarejestrowano nagłe zmiany wartości naprężeń łącznie ze zmianą ich znaku.

Zmiany naprężeń w zbrojeniu silosów opróżnianych przez otwory wysypowe usytuowane na różnych mimośrodkach badali również w Polsce Łapko i Stachurski [93]. Na rysunku 7.11 przedstawiono przykładowe wykresy zmiany naprężeń w czasie napełniania i opróżniania komory silosu w Kaliszu. Silos opróżniany był przez otwór wysypowy boczny usytuowany w ścianie komory. Naprężenia pomierzono na linii przechodzącej przez otwór wysypowy ($\neq 0^\circ$) oraz w linii bocznej odchylonej o kąt 45° od otworu wysypowego.

Z przedstawionych wykresów wynika, że krzywe naprężeń napełniania mają łagodnie rosnący przebieg od zera do wartości maksymalnej po zakończeniu cyklu. Wykresy opróżniania wykazują gradienty przyrostów lub spadków naprężeń w początkowej fazie opróżniania po otwarciu otworów wysypowych. Po kilku godzinach opróżniania przebieg naprężeń stabilizuje się, aż do czasu obniżenia się poziomu zboża nieco powyżej poziomu czujników. Porównanie obydwu zaprezentowanych wykresów wskazuje na bardzo istotną nierównomierność rozkładu naprężeń w zbrojeniu na krótkim (ok. 3,0 m) odcinku walcowej ściany komory. Różnice dotyczą nie tylko wartości, lecz również znaku.



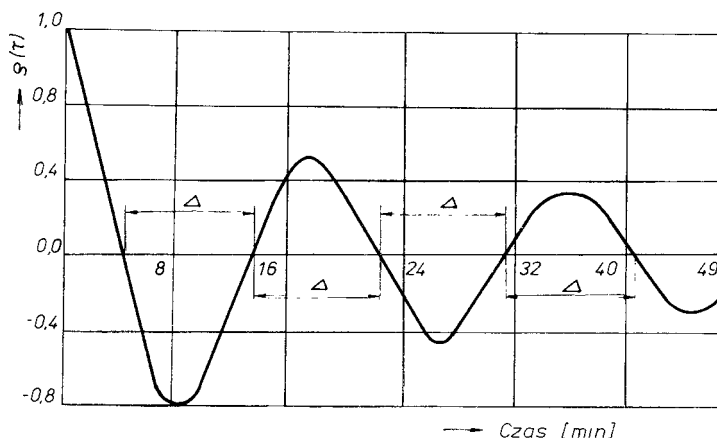
Rys.7.12. Wykresy zmian deformacji radialnych ścian silosu w skali naturalnej na poziomie +12,8 m w trakcie opróżniania [5]
 Fig.7.12. Changes of the radial strain in the wall of a full-size silo measured at the level of + 12.8 m during discharging [5]



Rys.7.13. Wykresy zmian odkształceń radialnych ściany silosu w skali naturalnej podczas trzech różnych procesów jednoczesnego napełniania i opróżniania [5]

Fig.7.13. Radial strain fluctuations in the wall of a full-size silo measured during three different processes of a simultaneous filling and discharging

Berdičevskij i in. [5] badali stan naprężeń i odkształceń radialnych żelbetowej prefabrykowanej baterii silosów o średnicy komór $D = 6,0$ m i wysokości 28,35 m. Pomiarów odkształceń dokonano w ścianach dwóch narożnych komór, w których występują największe deformacje. Wyniki badań wykazały, że podczas napełniania silosów ściany komór odkształcają się nierównomiernie. Po pierwszym obciążeniu odkształcenia osiągały maksy-



Rys.7.14. Wykres funkcji współczynnika asymetrii cyklu naprężeń określonej na podstawie badań silosów z komorami prostokątnymi [51]

Fig.7.14. The graph of the stress changes determined from the studies of rectangular-chamber silos [51]

malne wartości w granicach od 0,84–0,96 mm. Natomiast w następnych obciążeniach odkształcenia nie przewyższały wartości 0,31–0,42 mm. W momencie rozpoczęcia opróżniania silosu na poziomie +12,8 m wystąpiła nagle zmiana wartości deformacji ścian (rys.7.12). Zmiany te mają charakter falowy i prowadzą w niektórych punktach do zmiany znaku odkształceń na przeciwny.

W trakcie jednoczesnego napełniania i opróżniania silosu zanotowano również nierównomierne zmiany radialnych odkształceń ścian. W kilku cyklach tego typu radialne odkształcenia miały nie tylko różne wartości, lecz także różne znaki (rys. 7.13).

Rejestrowaną w opisanych badaniach pulsację radialnych odkształceń można podzielić na dwa następujące rodzaje:

- a) pulsację z maksymalną amplitudą równą 1,4–1,7 średnich wartości deformacji ze zmianą ich znaku,
- b) pulsację z maksymalną amplitudą mniejszą od 1,1 średnich wartości odkształceń.

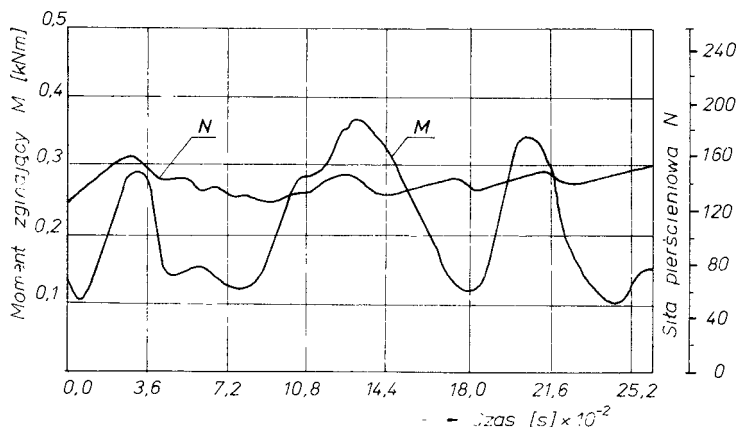
Podczas pulsacji pierwszego rodzaju okres zmian odkształceń radialnych wynosi 1–6 h, podczas pulsacji drugiego rodzaju zaś 10–30 min.

Do określenia charakterystyki przedziałów zmiany naprężeń obciążeń wielokrotnie zmiennych wykorzystuje się tzw. współczynnik asymetrii cyklu ρ , przedstawiający stosunek minimalnego naprężenia cyklu $\sigma_{\min}$ do jego wartości maksymalnej $\sigma_{\max}$

$$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (7.2)$$

Wartości współczynnika asymetrii cyklu naprężeń w zbrojeniu ścian prostokątnych komór silosów
w skali naturalnej

Miejsce i czas przeprowadzenia badań	Rodzaj operacji	Poziom pomiaru z	Pomiar punkto- wy w	Okres pulsacji T	Średni poziomy napór	Srednie odchy- lenie kwadra- towe	$\frac{\sigma_a \min}{\sigma_a \max}$
		(m)	(min)	(min)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	
Silos w Obojan 1973 (nr 1103)	jednoczesne napełnianie i opróżnianie 3 h 35 min	12	2	45	17,00	1,99	0,62
Silos w Obojan 1973 (nr 493- -4103)	j.w.	12	10	251	15,44	1,93	0,60
	9 h	12	5	242	15,26	1,91	0,63
	35 min	19,2	5	105	12,88	1,06	0,72
Silos w Kijowie 1974 (nr 10)	j.w.	6	5	67	29,70	2,50	0,71
	2 h 50 min j.w. lecz 6 h 40 min	6	5	110	28,17	3,20	
Silos w Kobeljaki 1974	j.w.	14,4	1	30	16,17	1,79	0,64
	1 h 05 min opróżnianie	14,4	2	142	25,58	2,61	0,65
	2 h 25 min opróżnianie 3 h	13,2	2	90	16,38	1,14	0,75



Rys.7.15. Wykresy zmian sił wewnętrznych (M i N) w trakcie opróżniania dużego silosu [51]

Fig.7.15. Internal force fluctuations (M i N) during discharging of a big silo [51]

Issers i in. [51] podali przykłady wartości współczynników ρ_a zbrojenia ścian prostokątnych i okrągłych komór silosów. Na podstawie badań prostokątnych komór silosów określono funkcję zmiany w czasie współczynnika asymetrii cyklu naprężeń w następującej postaci:

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha\tau} \cos \beta\tau, \quad (7.3)$$

gdzie τ - czas, $\alpha = 0,04$, $\beta = 0,35$.

Wykres funkcji $\rho(\tau)$ przedstawiono na rys. 7.14.

Wartości współczynników asymetrii cyklu obliczone z badań prostokątnych komór kilku silosów w skali naturalnej zestawiono w tab.7.2.

W silosach z komorami okrągłymi wykazano, że pulsacja naporu wpływa bardziej na zmianę równoleżnikowych momentów zginających M aniżeli na zmianę pierścieniowej siły rozciągającej N. Wykresy zmian sił wewnętrznych M i N wynikających z badań przedstawiono na rys. 7.15.

Funkcję makrocyclicznych zmian naprężeń w zależności od równoleżnikowych momentów zginających w silosach z komorami okrągłymi można opisać również za pomocą wzoru (7.3), przy czym należy przyjąć $\alpha = 0,21$ i $\beta = 0,6$.

Issers i in. [51] podają również wartości współczynników asymetrii cyklu naprężeń w zbrojeniu, obliczone na podstawie badań zmian rozwarości rys powstających w ścianach komór silosów. Wartości te potwierdzają wyniki obliczeń z bezpośrednich pomiarów naprężeń. Szerokość rozwarcia rys ulegała w trakcie opróżniania cyklicznym wahaniom. Amplituda

tych wahań wynosiła od 0,07 do 180 min. Wyniki pomiarów szerokości rys oraz obliczone na ich podstawie wartości stosunku naprężeń minimalnych i maksymalnych zestawiono w tab.7.3.

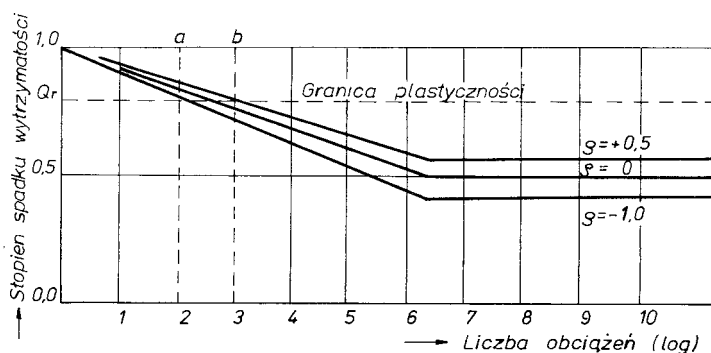
T a b e l a 7.3

Wartości współczynników asymetrii cyklu naprężeń obliczonych na podstawie badań rozwarcia rys

Amplituda rozwarcia rys (mm)	Okres pulsacji T (min)	Przyrost naprężeń w zbrojeniu (MPa)	$\rho_a = \frac{\sigma_a \min}{\sigma_a \max}$
0,3	180	210	0,73
0,045	90	29	0,95
0,004	0,07	3	0,995

7.4. Wpływ obciążeń wielokrotnie zmiennych na wytrzymałość żelbetowych ścian silosów

Wielokrotne obciążenie konstrukcji budowlanej prowadzi do zmniejszenia jej nośności. Obniżenie nośności zależy od liczby zmian obciążenia oraz od wartości zmian naprężeń w materiale konstrukcyjnym.



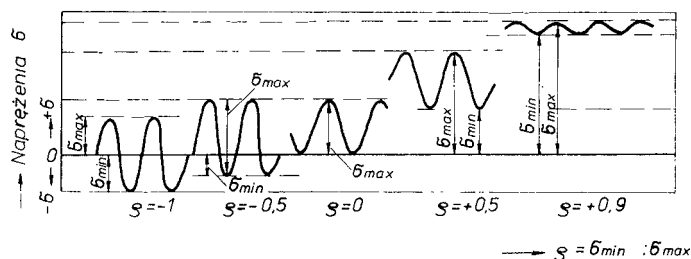
Rys.7.16. Zmniejszenie nośności konstrukcji podczas działania obciążeń wielokrotnie zmiennych [81]

Fig.7.16. Decrease in the bearing capacity of the structure due to repeatedly changing load [81]

Na rysunku 7.16 przedstawiono wykresy ilustrujące obniżenie nośności stali (granicy plastyczności ok. 400 MPa) dla różnych stosunków naprężeń $\sigma_{\min}$ i $\sigma_{\max}$ w zależności od liczby zmian obciążeń.

Na rysunku 7.17 pokazano wykresy zmian naprężeń, dla których wartość współczynnika asymetrii cyklu wynosi od -1,0 do +0,9.

Z wykresów zamieszczonych na rys.7.17 wynika, że gdy jest mała liczba zmian obciążeń około 100-1000 (na rys. obszar a-b) obniżenie noś-



Rys.7.17. Przedziały zmian naprężeń w różnych cyklach obciążenia wielokrotnie zmiennego [81]

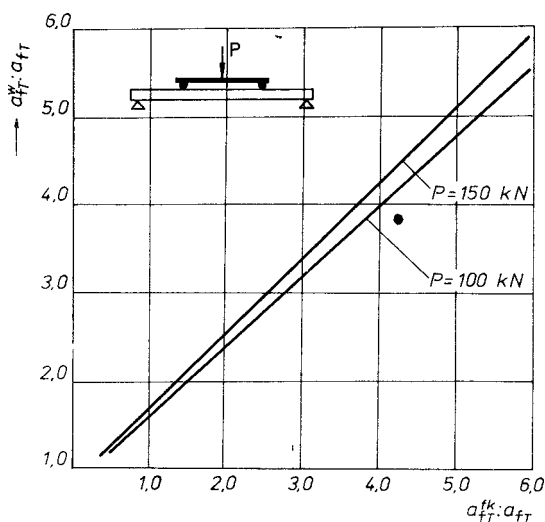
Fig.7.17. Stress variation ranges during different cycles of repeatedly changing load [81]

ności konstrukcji będzie niewielkie bez względu na wartość stosunku naprężeń $\sigma_{\min} : \sigma_{\max}$. Dalszy wzrost liczby zmian obciążeń objawia się liniowym zmniejszeniem nośności, przy czym maksymalny jej spadek występuje, gdy $\rho = -1,0$. Gdy liczba zmian obciążeń przekracza jeden milion, nie obserwuje się spadku nośności konstrukcji. W obliczeniach inżynierskich w praktyce uwzględnia się najczęściej spadek nośności stali, gdy liczba obciążeń w okresie użytkowania obiektu przekracza 500 000. Nieco inaczej zachowywać się będzie konstrukcja żelbetowa, zwłaszcza jeżeli jest wykonana w postaci cienkiej płyty lub powłoki.

Ściany silosów podlegają działaniom obciążeń wielokrotnie zmiennych o charakterze dynamicznym. Nierównomierny rozkład obciążenia oraz towarzysząca mu pulsacja wywołują w ścianach silosu równoleżnikowe momenty zginające, które w trakcie opróżniania znacznie wzrastają i mogą także zmieniać znak na przeciwny. Zmiana odkształceń nie tylko co do wielkości, lecz również co do znaku, pogarsza warunki konstrukcji na zmęczenie i obniża poziom trwałej wytrzymałości materiału, z którego jest wykonana konstrukcja.

W pracy [148] wykazano, że beton pod działaniem zmiennych obciążeń ściskających, zmieniających się w granicach od 0 do $(0,5-0,9) R_b$ nie ma granicy zmęczeniowej i niszczy się już przy bardzo małej liczbie obciążeń. Praca zbrojenia w elemencie żelbetowym przebiega w gorszych warunkach aniżeli np. konstrukcji wykonanej z samej stali. Z tego też powodu wytrzymałość zmęczeniowa zbrojenia będzie mniejsza aniżeli wynikałoby to z samych właściwości stali.

W rozciąganych elementach żelbetowych już podczas pierwszego obciążenia statycznego powstają rysy. Rysy te pod działaniem wielokrotnie zmiennych obciążeń ulegają znacznemu powiększeniu. Występują przy tym dwa zjawiska. Pierwsze związane z działaniem obciążenia wielokrotnie zmiennego w jednym kierunku, drugie zaś wiąże się z działaniem obciążenia wielokrotnie zmiennego o różnych znakach.



Rys.7.18. Zależność szerokości powtórnego rozwarcia rysy a_{fT}^n od jej uprzedniego rozwarcia a_{fT}^{fk} wywołanego lokalnym obciążeniem o znacznej wartości [83]

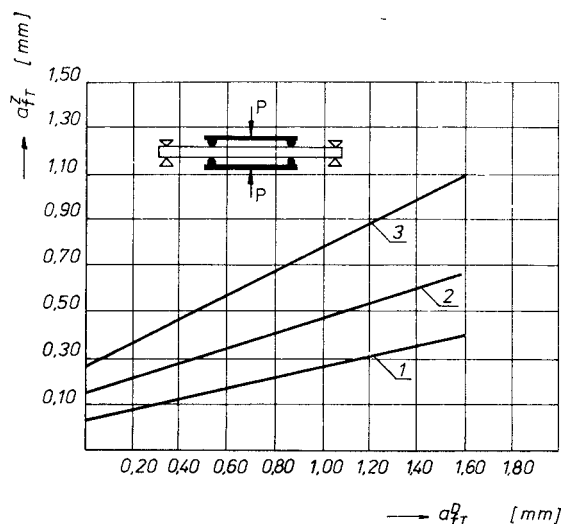
Fig.7.18. The dependence of the width of the reopened crack a_{fT}^n on its former width, a_{fT}^{fk} , the reopening being caused by a local loading of a considerably great value [83]

W licznych wykonanych dotychczas pomiarach stwierdzono, że w trakcie opróżniania silosu występują lokalne wzrosty wartości naporu, powodujące krótkotrwałe rozwarcie rys powyżej wartości dopuszczalnych przepisami normowymi. Zjawisko to w sposób decydujący wpływa na wartość końcowego rozwarcia rysy, wywołanej następnymi jednokierunkowymi obciążeniami o intensywności znacznie mniejszej od obciążenia lokalnego.

Eksperymentalne badania wpływu małocyklicznych obciążeń na pracę żelbetowych ścian silosów prowadził Krajev [83]. Wykonał on pomiary rysoodporności i odkształcalności próbek elementów ścian silosu prostokątnego o wymiarach przekroju poziomego 3 x 3 m. Powierzchnia badanych elementów ściennych wynosiła 25 cm x 65 cm, grubość zaś 10 cm.

Zastosowano obciążenie zmienne, którego wartość była o 25% większa od obciążenia wywołującego rysy. Liczba obciążeń zmiennych w czterech pierwszych seriach wynosiła 20, w piątej zaś 2250. Na rysunku 7.18 przedstawiono wykresy obrazujące zależność szerokości rys od uprzedniego ich rozwarcia pod wpływem jednorazowego krótkotrwałego działania obciążenia o znacznej wartości. Wykresy te udowadniają, że chwilowe przeciążenie żelbetowej konstrukcji może być bardzo niebezpieczne dla jej późniejszego stanu zarysowania. Badane elementy obciążano skupioną siłą o stałej wartości (100 kN lub w drugim badaniu 150 kN). Siła ta przy pierw-

szym obciążeniu statycznym wywołała w badanym elemencie rysę szerokości a_T (szerokość dopuszczalna normą). Następnie jednorazowo przyłożono krótkotrwałe obciążenie o znacznej wartości, które spowodowało rozwarcie tej rysy do szerokości a_T^{fk} znacznie większej od szerokości a_T . Ponowne obciążenie skupioną siłą o wartości początkowej (100 lub 150 kN) wywoływało pojawienie się rysy a_T^w , której szerokość była również kilkakrotnie większa od szerokości początkowej rysy a_T (pomimo że przyłożone zostało takie samo obciążenie). Badania takie powtarzano stosując różne wartości krótkotrwałych zwiększonych obciążeń.



Rys.7.19. Zależność rozwarcia rys w strefie rozciąganej (a_T^r) od uprzedniego rozwarcia rys w strefie ściskanej (a_T^k) podczas działania obciążenia wielokrotnie zmiennego w dwóch kierunkach [83]

Fig.7.19. The opening in the region in tension (a_T^r) as a function of its former width in the region in compression (a_T^k) at repeatedly changing load acting in two directions [83]

W następnej serii badań, w wyniku zastosowania obciążenia wielokrotnie zmiennego o stałej wartości, lecz działającego w dwóch kierunkach stwierdzono, że odporność betonu próbek na zarysowanie zmniejsza się i zależy od stopnia uprzedniego zarysowania strefy ściskanej (gdy strefa ta podczas pierwszego obciążenia była strefą rozciąganą). Ilość rys w strefie ściskanej stymuluje rozwój rys w strefie rozciąganej. Powstają one zawsze w miejscach odpowiadających położeniu rys po stronie przeciwnej i zmieniają się przy następnych znakozmiennych obciążeniach w przechodząc na wskroś przekroju. Istnienie rys w strefie ściskanej prowadzi do powiększenia ugięcia i szerokości rozwarcia rys w strefie

rozciąganej. Jest to związane z pełniejszym (niż przy jednostronnym obciążeniu) naruszeniem sił przyczepności betonu i stali, z plastycznymi odkształceniami występującymi podczas ściskania zarysowanego betonu oraz ze zmniejszeniem wartości współczynnika sprężystości betonu.

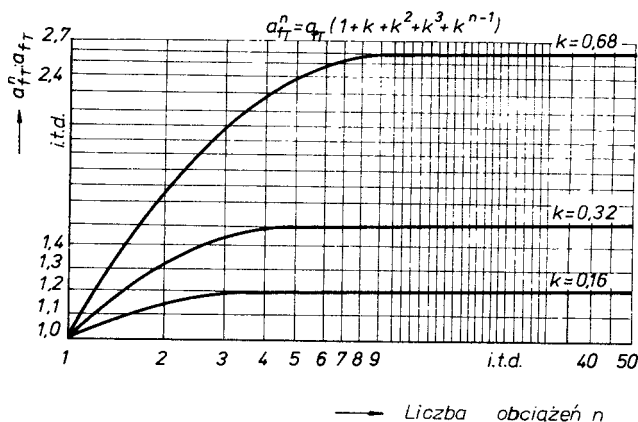
Wynikającą z badań [83] zależność szerokości rozwarcia rys od uprzedniej ich szerokości w strefie ściskanej przedstawiono na rys. 7.19. Szerokość rozwarcia rys w strefie rozciąganej zależy również od wartości wielokrotnie zmiennego obciążenia działającego w dwóch kierunkach. Największy wpływ rys, które występowały wcześniej w strefie ściskanej, występuje podczas dużych obciążeń (linia 3 - rys. 7.19).

Przedstawione zależności na rys. 7.19 można wyrazić następującym równaniem:

$$a_f = a_T^r + K a_T^s, \quad (7.4)$$

gdzie składnik $K a_T^s$ określa dodatkowy wzrost szerokości rysy a_T^r , wynikający z uprzedniego rozwarcia rysy w strefie ściskanej a_T^s . Współczynnik K zależy od poziomu obciążenia konstrukcji, a jego wartość można wyrazić wzorem:

$$k = 9 \left(\frac{\sigma_a}{10000} \right)^3. \quad (7.5)$$



Rys. 7.20. Zależność szerokości rozwarcia rys od liczby obciążeń znakozmiennych [83]
Fig. 7.20. Width of the opening as a function of the number of sign-changing loads

Faktycznie proces rozwijania się rys podczas działania znakozmiennych obciążeń wielokrotnych ma charakter zanikający i zależy od liczby zmian tych obciążeń. Podczas działania znakozmiennych obciążeń o stałej intensywności końcowa szerokość rys przy n obciążeniach wyniesie

$$a_T^n = a_{fT} \frac{1 - K^n}{1 - K}, \quad (7.6)$$

gdzie

a_{fT} - szerokość rysy występującej przy pierwszym obciążeniu statycznym,

n - liczba obciążeń znakozmiennych,

K - współczynnik obliczany ze wzoru (7.5).

Zależność (7.6) dla trzech różnych poziomów obciążeń przedstawiono w postaci wykresów na rys. 7.20. Przy znakozmiennym obciążeniu konstrukcji do poziomu obciążeń obliczeniowych wartość współczynnika K będzie się zmieniać w granicach od 0,16 do 0,32. Należy się zatem w praktyce liczyć ze zwiększeniem szerokości rys w granicach od 20 do 50% (na rys. 7.20 wartości ilorazu $a_f^n : a_{fT}$ od 1,2 do 1,5).

Z przedstawionego rysunku wynika również wyraźnie, że działanie obciążeń znakozmiennych o dużych wartościach ($K = 0,62!$) przewyższających wartość obciążeń obliczeniowych może prowadzić do pojawienia się rys o znacznej rozwarości (prawie trzykrotnie większych od rys wywołanych jednokrotnym obciążeniem statycznym. Prowadzi to do tworzenia się przelotowych rys (tzn. przechodzących na wskroś przekroju), w wyniku których następuje wykrętszenie się betonu i powstawanie głębokich wyrw.

7.5. Wnioski

Przedstawione wyniki badań wskazują, że wielokrotnie zmienne oddziaływanie materiału sypkiego w istotny sposób wpływają na zmniejszenie niezawodnej pracy żelbetowych konstrukcji silosów. Sformułować można tutaj następujące wnioski:

1. W trakcie opróżniania silosów napór materiału sypkiego ulega cyklicznym zmianom. Wartości amplitudy i częstotliwość zmian zależą od rodzaju materiału sypkiego, proporcji geometrycznych silosu i szorstkości ścian komory.

2. Pomiary na modelach i obiektach w skali naturalnej wykazały, że naprężenia w betonie i zbrojeniu ścian silosów zmieniają się falowo przybierając również zmienne znaki.

3. Badania elementów żelbetowych ścian silosów wykazały, że nawet niewielka liczba obciążeń zmiennych prowadzi do zwiększenia rozwarości rys w betonie.

4. Niekorzystnie na stan zarysowania ścian silosów wpływa chwilowe ich przeciążenie powodujące krótkotrwałe rozwarcie rys powyżej wartości dopuszczalnej normami. W trakcie opróżniania silosu zjawisko takie może wystąpić np. w wyniku miejscowego zwiększenia wartości naporu poziomego.

5. Działanie małowyklicznych obciążeń o zmiennych znakach prowadzi do dodatkowego powiększenia rozwarcia rys oraz pojawienia się rys przechodzących na wskroś przekroju ścian. Wskutek działania tych obciążeń wykrusza się beton i powstają głębokie wyrwy w ścianach silosów.

8. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym opracowaniu wyniki badań wykazały, że wartości i rozkład naporu materiału sypkiego zależą od bardzo wielu parametrów nie uwzględnianych często w praktyce podczas projektowania silosów.

Parametry te można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej z nich mogą być zaliczone parametry zdecydowanie wpływające na wartości i rozkład naporu:

- rodzaj materiału sypkiego
- pochylenie ścian i dna silosu
- smukłość komory
- kształt poprzecznego przekroju komory
- szorstkość wewnętrznych powierzchni ścian z uwzględnieniem możliwości ich wygładzenia przez niektóre gatunki zbóż
- sztywność konstrukcji ścian i dna
- sposób napełniania komory
- usytuowanie otworu wysypowego względem osi komory (symetryczne lub niesymetryczne)
- jednoczesne napełnianie i opróżnianie silosu.

Druga grupa obejmuje słabiej oddziałujące parametry takie, jak intensywność napełniania i opróżniania.

Znaczenie wpływu rodzaju materiału sypkiego na rozkład naporu w silosach podkreślone jest coraz częściej w najnowszych wynikach badań. Wyniki pomiarów prowadzonych na identycznych obiektach po zastosowaniu różnych materiałów sypkich różnią się między sobą nie tylko pod względem ilościowym, lecz także i jakościowym.

Dlatego należy stwierdzić, że na podstawie badań jednego rodzaju materiału sypkiego nie można wyciągnąć wniosków dotyczących zachowywania się wszystkich materiałów. Wynika stąd również wniosek, że stosowa-

wane obecnie cechy opisujące materiał sypki w niedostateczny jeszcze sposób odzwierciedlają jego oddziaływania na konstrukcję silosu.

Uchwycenie wpływu niektórych parametrów konstrukcji silosu lub eksploatacji jest bardzo trudne i wymaga prowadzenia wielu badań. Na przykład wpływ smukłości komory wiąże się zarówno ze sposobem opróżniania, jak i z rodzajem materiału sypkiego.

W badaniach opróżniania symetrycznego wykazano, że w silosach niskich wzrost wartości naporu poziomego jest nieznaczny. Wraz ze zwiększeniem się smukłości komory wzrost wartości naporu poziomego jest coraz większy. Podczas opróżniania niesymetrycznego funkcja wpływu smukłości zmienia się natomiast dla różnych materiałów sypkich. W silosach wypełnionych pszenicą względny wzrost wartości naporu poziomego jest wyższy w silosach niskich aniżeli w smukłych. Odwrotna zależność występuje np. dla płasku.

Wyniki uzyskane z badań wpływu takich parametrów, jak: pochylenie ścian, szorstkość, sztywność konstrukcji ścian lub dna oraz sposób napełniania wskazują na duże możliwości zastosowania ich do projektowania nowych konstrukcji silosów zapewniających maksymalną redukcję wartości oddziaływań materiału sypkiego (np. silosów zbieżnych ku górze, komór z podatnymi ścianami lub dnem itp.).

Wyniki badań wskazują na istnienie znacznej nierównomierności rozkładu naporu poziomego działającego na ściany silosu. Stopień tej nierównomierności zależy m.in. od:

- kształtu poziomego przekroju komory (koło, prostokąt, gwiazdka, krzyż, pierścień w silosie koncentrycznym itp.),
- zmiany podatności ściany wzdłuż obwodu komory (węzły, żebra itp.),
- mimośrodowość usytuowania otworu zasypowego i wysypowego (napełnianie lub opróżnianie symetryczne lub niesymetryczne).

W trakcie opróżniania silosu napór materiału sypkiego ulega cyklicznym zmianom, a amplituda tych zmian może osiągać duże wartości. W badaniach w skali naturalnej zarejestrowano również lokalne wzrosty wartości naporu znacznie przewyższające średnie wartości przyjmowane do obliczeń ścian silosów.

Zarówno cykliczne zmiany wartości naporu, jak i nadmierne lokalne wzrosty wpływają niekorzystnie na konstrukcyjną niezawodność silosów. Na przykład w silosach żelbetowych obydwa te zjawiska mogą doprowadzić do dużego powiększenia się rozwarości rys w ścianach lub lejach.

W badaniach silosów, szczególnie w skali naturalnej, występują znaczne rozrzuty w mierzonych wartościach naporu. Rozrzuty te wywołane są przyczynami losowymi związanymi przede wszystkim ze zmianami właści-

wości materiałów sypkich. Właściwości nieregularnych struktur materiałów sypkich mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach (np. w wyniku różnego ułożenia się ziaren). Dlatego w celu obiektywnej oceny wartości naporu należałoby wykonać zwiększoną liczbę badań umożliwiających statystyczne opracowanie wyników.

W praktyce wykonanie dużej liczby pomiarów na obiekcie w skali naturalnej wiąże się zawsze z ogromnymi kosztami. Badania takie są często niemożliwe chociażby ze względu na brak aparatury naukowo-badawczej, która mogłaby niezawodnie pracować w długich okresach.

Wymienione trudności są powodem częstego sięgania przez badaczy do badań silosów na modelach. W modelach silosów uzyskuje się o wiele lepszą powtarzalność wyników pomiarów, można dowolnie zwiększyć ich liczbę i jednocześnie z pomiarami naporu istnieje możliwość prowadzenia obserwacji zachowywania się materiału sypkiego w trakcie napełniania i opróżniania silosu.

Zdaniem autora niniejszej pracy najbliższe badania naporu materiału sypkiego w silosach powinny się koncentrować przede wszystkim na następujących problemach:

1. Określeniu dodatkowych fizyko-mechanicznych właściwości materiału sypkiego, umożliwiających uwzględnienie odmiennego zachowywania się różnych materiałów sypkich w identycznych silosach.
2. Badaniu rozkładu naprężeń w materiale sypkim w całym przekroju komory silosu w trakcie jej napełniania i opróżniania.
3. Wyznaczaniu związków między parametrami eksploatacji silosu a rodzajem płynięcia materiału sypkiego.
4. Uściśleniu liczby zmian wartości naporu w okresie przewidywanej eksploatacji silosu.
5. Wyjaśnieniu rozbieżności dotyczących wpływu intensywności opróżniania silosu na zmianę wartości naporu materiału sypkiego.

LITERATURA

- [1] ACI Standard 313-77. Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos, and Bunkers for Storing Granular Materials. American Concrete Institute, 1977.
- [2] ALEKSANDROVIĆ A.K., MARKIN B.S., RODIONOV M.G., HOROŠIJ I.S., Issledovanie na modeljach devlenija zerna w silosach koncentričeskogo tipa. W: Konstrukcji i tehnologija stroitelstva sooruzenij silosnogo tipa. (13), 1975, s. 46-50.
- [3] AOKI R., TSUMANOWA H., Recent Works in Japan on Silo Loads. Japan, 1972 (wyd. specjalne).
- [4] BANACHOWICZ G., MITZEL A., KAMIŃSKI M., Grain Pressure on Silo Walls with Assymmetric Outflow. International Symposium on Silos. 3rd Working Session of the IASS Committee of Pipes and Tanks, June 25-28, Wrocław 1973.

- [5] BERDIČEVSKIJ G.I., BOLTJANSKI E.Z., GEJLER E.S., ZAMOČENIUK A.N., IVANOV B.M., ISSERS F.A., PLATONOV P.N., SKORIKOV B.A., CYNALJEVSKIJ V.G., Kompleksnoe issledovanie raboty sbornogo korpusa s silosami iz krivolinejnyh prednapriazhennyh železobetonnyh elementov. W: Issledovanija napriazhennogo sostojanija železobetonnyh silosnyh sooruzenij. Izd. Saratovskogo Universiteta. Saratov 1975, s. 83-106.
- [6] BLIGHT G.E., MIDGLEY D., Pressure Measured in a 20 m Diameter Coal Load - out Bin. International Conference on Design of Silos for Strength and Flow. University of Lancaster, UK 2nd-4th September 1980.
- [7] BOLTJANSKI E.Z., IVANOV B.M., KAREV V.I., PLATONOV P.N., SKORIKOV B.A., Eksploatacjonnaja nadežnost' elevatorov, Kolos, Moskva 1976.
- [8] BORCZ A. (red.) Dynamiczny napór piasku na ściany silosu w chwili otwarcia szczeliny wylotowej. Raport Inst. Bud. PWr., Wrocław 1976.
- [9] BORCZ A., KMITA J., ZAWIDZKI J., Doświadczalne badania parcia materiału sypkiego podczas ustalonego wypływu z zasobnika klinowego. Arch.Inż.Ląd. 24, 1978, s. 591-603.
- [10] BORCZ A., MAJ M., SULEJA J., Doświadczalny napór cementu na ściany i dno silosu. W: Silosy - badanie, projektowanie, budowa, użytkowanie, Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 44, Wrocław 1985, s. 37-41.
- [11] BANACH R., BORCZ A., Doświadczalny napór i pole temperatury w zbiorniku mączki surowcowej. W: Silosy - badanie, projektowanie, budowa, użytkowanie, Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 44, Wrocław, 1985, s. 51-56.
- [12] BUDKOWSKA B., W sprawie obliczania parcia statycznego w lejach silosów. Zesz. Nauk. Pol. Gdańskiej nr 180, 1971.
- [13] BORUSZAK A., SYGULSKI R., Parcie materiałów sypkich na ściany-silosów. Inżynieria i Budownictwo 10 (1972), s. 393-397.
- [14] BOVEY A., Experiments on Grain Pressures in Deep Bins and the Strength of Modern Bins. Engineering News 1904, II, p. 32.
- [15] BUTTERFIELD R., Theoretical Study of the Pressures Developed in a Silo Containing Single-sized Particles in a Regular Packing. Intern. J. Rock. Mech. Mining Sci. 6/1969, pp. 227-247.
- [16] CAGUOT A., La pression dans les silos. Proc. 4th ICOSOMFE, London, vol. 2, 1957, pp. 191-195.
- [17] CAGUOT A., KERSEL J., Traite de mecanique des sols. Gauthier Villars, Paris 1956.
- [18] ČSN 735570 Navrhování konstrukcí zásobníku (Designing of structures of storage tanks), 1978.
- [19] DĄBROWSKI R., Parcie materiałów sypkich w leju. Arch. Inż. Ląd. 3, 1957, s. 325-334.
- [20] DESPYROUX M.F., Effort exercé sur les parois par la matière ensilée. Annales de l'Institut, Technique du Batiment et des Travaux Publics, vol. 11, nr 131, 1958.
- [21] DIN-1055, Bl. 6, Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen, 1964.
- [22] DIN-1055, Bl. 6, Lasten in Silozellen. Entwurf der 2. Neufassung.
- [23] DIN-1055, Bl. 6, Lasten in Silozellen. Entwurf der 9. Neufassung 1980.
- [24] DRESCHER A., Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach. PWN, Warszawa - Poznań 1983.
- [25] DZIENDZIEL A., KOBIELAK S., RYBIANSKI M., Badania zbiorników na przetwory zbożowe. Etap I, Raport Inst.Bud.PWr., nr 78 Wrocław, 1980. Etap II Raport Inst.Bud.PWr., nr 18, Wrocław 1983.
- [26] DZIENDZIEL A., KOBIELAK S., RYBIANSKI M., Badania silosów na materiały trudnosypkie. Raport Inst.Bud. PWr. nr 68, Wrocław 1978.
- [27] DZIENDZIEL A., KOBIELAK S., MUSZAŁSKI M., RYBIANSKI M., Przegląd zrealizowanych w kraju silosów na mąkę i otręby. Konferencja nauk. techn. Silosy. Kudowa 1978.

- [28] DZIENDZIEL A., KOBIELAK S., RYBIŃSKI M., Urządzenia wspomagające wpływ materiałów rozdrobnionych ze zbiorników. Przegląd Zbożowo-Młynarski cz. 1 nr 1, 1982, cz. 2 nr 2, 1982.
- [29] EHLERS K., Beiträge zur Ermittlung von Schüttgutkonstanten und deren Einfluss auf Silolasten. Dissertation TU Braunschweig, 1979.
- [30] EIBL J., LANDAHL H., HAUSSLER U., GLADEN W., Zur Frage des Silo-druckes. Beton- und Stahlbetonbau 4, 1982, S. 104-110.
- [31] FLATAU K., HAUMER W., Beitrag zur Entscheidungsfindung in Planung und Entwurf von Silobauwerken unter besonderer Berücksichtigung des Lagergutes Getreide. Dissertation HAB Weimar 1980.
- [32] FOMIN G.A., Opređenje usilij w stenach kruglych železobetonnyh silosov. W: Issledovanie konstrukcij i rasčet elevatornych sooruzenij. Naučnye trudy SNII promzernoprojekt, 1974, s. 102-115.
- [33] FORT J.C., Brückenbildung in Silos. Aufbereitungs-technik Nr 11, 1978, S. 529-535.
- [34] FRESE B., Druckverhältnisse in zylindrischen Silozellen, Ein Beitrag zum Problem der Druckverteilung über den Umfang und die Höhe der Zellenwand beim zentrischen und exzentrischen Entleeren. Dissertation Universität Karlsruhe, 1977.
- [35] GALETOV A.P., TRUCHLOV A.M., Teoretičeskie i eksperimentalnoe issledovanie vzaimodejstija zernovo massiva so stenkami silosov iz gibkogo elastičnogo materiala. W: Issledovanija napriazennogo sostojanija železobetonnyh silosnyh sooruzenij. Saratovskij Politechničeskij Institut, Saratov 1971.
- [36] GARBUZ V.I., Vlijanie skorosti vypuska sypučego materiala na napriazennoe sostojanie stenok kruglyh silosov. Stroitel'naja mehanika i rasčet sooruzenij nr 2, 1979, s. 12-16.
- [37] GARG R.M., GOPALAKRISHNAN S., An Experimental Investigation of Wall Loads in Wheat Silos. Indian Concrete Journal nr 10, 1974, s. 308-313.
- [38] GENIEV A.G., Voprosy dynamiki sypučej sredy. Inst. Nauč. Ak. Konstr. i Arch. ZSRR, Moskva 1958.
- [39] GLUSKOV G.I., Statika i dinamika sooruzenij zaglubionych v grunt. Moskva 1967.
- [40] GOPALAKRISHNAN S., Determination of Silo Wall Loads through Experimental Investigation on Model Silo. Arbeitssitzung des IASS Komitee, Braunschweig 1977.
- [41] HANCOCK A.W., NEDDERMAN R.M., Prediction of Stresses on Vertical Bunker Walls. Trans. Instn. Chem. Engres. Bd. 52, 1974, S. 170-179.
- [42] GRABIEC K., Konstrukcje cienkościenne. PWN, Warszawa-Poznań 1976.
- [43] HAMPE E., FLATAU K.A., Silo Pressure Due to Eccentric Discharge. 11th Working Session of the IASS Committee of Pipes and Tanks, W: Aktualne osiągnięcia w dziedzinie budowy silosów, Pr. nauk. Inst. Bud. PWR., nr 39, Wrocław, s. 161-178.
- [44] HAMPE E., KAMINSKI M., Der Einfluss exzentrischer Entleerung auf die Druckverhältnisse in Silos. Die Bautechnik Nr 3, 1984, S. 73-82, T. I; Nr 4, 1984, S. 136-142, I. II.
- [45] HARTMANN F., Berechnung des Fülldruckes in einem Silo. Beton- und Stahlbetonbau H. 7, 1966, S. 177-183.
- [46] HENNY G.E.J., ALBERSBERG P., ELLIOTT G.E.B., STAMM P.H.H., Lessons Learnt from the Development of Large Diameter Free - Standing Grain Storage Bins in Southern Afrika. International Conference on Design of Silos for Strength and Flow. University of Lancaster, UK 2nd-4th, September 1980. Copyright Powder Advisory Centre, London 1980.
- [47] HIERLEIN J., Untersuchungen über Druckverhältnisse in einem Doppelzylindrischen Silo. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1974.
- [48] HOFFMAN O.H., Verdichtungsverhalten körniger Landwirtschaftlicher Haufwerke. Dissertation T.U., Braunschweig 1975.

- [49] HOROŠIJ I.S., RADIONOV M.G., SEMIATYCKIJ L.M., AVAKOV A.I., KADYSEV P.K., Issledovanie nagruzok ot zerna v modeljach krestobraznogo silosa. W: Sbornik trudov. Konstrukcija i tehnologija stroitelstva sooruzenij silosnogo tipa. CNIIZP Selstroj, Moskva 1975, s. 32-37.
- [50] ISAACSON J.D., BOYD J.S., Mathematical Analisis of Lateral Pressures in Flat-Bottomed Deep Grain Bins. Trans ASME 1965, pp.358-364.
- [51] ISSERS F.A., GEILER E.S., KRAJEC W.I., Koefficienty asimetrii ciklov napriazhenij w stenach železobetonnych silosov pri ističenii sypučego materiala. Stroitel'naja Mekhanika i Rasčet Sooruzenij nr 1, 1979, s. 16-19.
- [52] IVANOV B.M., PLATONOV P.N., ZAMOCENIUK A.P., CYNALJEVSKI V.T., Vlijanie uprugich svojstv sten silosa na wieličinu i charakter razpredelenija davlenia. W: Issledovanie konstrukcij i rasčet elevatorskich sooruzenij. Kolos, Moskva 1974, s. 94-101.
- [53] IZBICKI R., MRÓZ Z., Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skał. PWN, Warszawa 1976.
- [54] JAHNS H., Der Versatzdruck in steiler Lagerung nach Ergebnissen von Modellversuchen. Glückauf, H. 5, 1960, S. 269-278.
- [55] JAKY J., Validity of Columbs law Stability. Proc. III COSMOEF, vol. 1, Rotterdam 1948.
- [56] JANSSEN H., Versuche über Getreidedrucks in Silozellen. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 39, nr 35, 1985, S.1045-1049.
- [57] JAROPOLSKI J.V., Polovye i laboratornye issledovania ustojčivosti i pročnosti svaj i špuntoj stenki, Trudy SNIIVTa, wyd. 159, 1935.
- [58] JENIKE A.W., JOHANSON J.R., Bin Loads, Journal of the Structural Division Proceedings of the ASCE, April 1968, p. 1011.
- [59] JENIKE A.W., JOHANSON J.R., CARSON J.W., Bin Loads-Part 2, 3, 4. The American Society of Mech. Engineers, Paper no 72, MH 1,2,3.
- [60] JENIKE A.W., Steady gravity flow of frictional cohesive solids in converging channels. J. Appl. Mech. Trans. ASME, 31E, 1964, s. 5-11.
- [61] KAMIŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Badania wpływu sposobów opróżniania na poziomy napór w cylindrycznych komorach żelbetowych silosów na zboże. Praca doktorska, Bibl. Inst. Bud. PWr., 1977.
- [62] KAMIŃSKI M., Betrieb von Silos mit exzentrischem Auslauf. Die Bautechnik Nr 6, 1979, S. 203-204.
- [63] KAMIŃSKI M., Badania modelowe silosów na cukier - etap I. Inst. Bud. PWr., Raport Serii SPR Nr 59/80, Wrocław 1980.
- [64] KAMIŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Untersuchungen des Getreidedrucks in der Zelle eines Grosssilos. Die Mühle - Mischfüttertechnik 117, 1980, H. 27/28, S. 371-372.
- [65] KAMIŃSKI M., Vorschläge zur Bestimmung der vom Schüttgut ausgeübten horizontalen Druckkräfte beim unsymmetrischen Entleeren des Silos. Die Mühle + Mischfüttertechnik H. 51/52, 1980, S.707-717.
- [66] KAMIŃSKI M., Untersuchungen des Getreidedrucks in Silozellen Die Bautechnik 58, 1981, H. 1, s. 19-23.
- [67] KAMIŃSKI M., Badania modelowe silosów na cukier. Raport serii SPR nr 35/82, Inst. Bud. PWr., Wrocław 1982.
- [68] KAMIŃSKI M., Effekt der Schichtmässigen Getreidebewegung in der Silozelle, Die Mühle + Mischfüttertechnik H. 12, 1982, S. 149-157.
- [69] KAMIŃSKI M., MARCINKOWSKI Z., ZUBRZYCKI M., Obciążenie w silosach o małym pochyleniu ścian. Przegląd Budowlany nr 1-2, 1983, s. 35-38.
- [70] KAMIŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Poziome obciążenie ścian oraz stan naprężenia w zbrojeniu komory żelbetowej baterii silosów zbożowych. Inżynieria i Budownictwo nr 2, 1983, s. 64-68.

- [71] KAMIŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Żelbetowe silosy na zboże. Badania i projektowanie. Pr. nauk. Inst. Bud. PWR., nr 41, Wrocław 1985.
- [72] KAMIŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Wytyczne projektowania przewodów redukujących napór poziomy zboża w silosach. Inżynieria i Budownictwo nr 1, 1981, s. 35-38.
- [73] KAMIŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Reduzieren des dynamischen Horizontal-druckes in Getreidesilos. Bauingenieur 60/1985, S. 313-318.
- [74] KŁOŚ C., SIENICKI S., DOMASZEWSKI H., Zbiorniki materiałów sypkich. Arkady, Warszawa 1955.
- [75] KOBIĄK I., STACHURSKI W., Konstrukcje żelbetowe cz. 2, Arkady, Warszawa 1979.
- [76] KOBIELAK S., Badania wpływu parametrów napełniania i aeracji na napór cementu składowanego w silosie. Raporty Inst. Bud. PWR., Wrocław 1973 (praca doktorska).
- [77] KEZDI A., Erdrucktheorien, Wien 1962.
- [78] KEZDI A., Contributions to the Investigations of Granular Systems. Rheology and Soil Mechanics Symposium. Grenoble 1964, pp. 1964-1978.
- [79] KLOPSCH E., Zur Bemessung prismatischer silos mit Wänden aus Well-bech und starr gestützten Ecken. Dissertation TU, Braunschweig 1972.
- [80] KOENEN M., Berechnung des Seiten- und Bodendruckes in Silozellen, Centralblatt der Bauverwaltung, Nr 16, 1896, S. 446-447.
- [81] KORCINSKI I.L., Predvaritelno napriazhennoj železobeton v sejsmostojkom stroitelstve. Beton i železobeton nr 1, 1965, s. 13-16.
- [82] KORDINA K., FRÖNING H., Druckmessungen in Silozellen mit einer neu entwickelten Sonde. H. 44. TU Braunschweig.
- [83] KRAEV V.I., Vlijanie malocykličnych znakovremennych nagruženij na raboty vnutrennych sten silosov. W: Issledovanie napriazhenogo sostojanija železobetonnych silosnych sooruzenij, Saratov 1981, s. 40-46.
- [84] KUROČKIN A.M., Napriazhenia sypučich materialov v silosach. Issledovanija odnosjasčesja k rasčetom silosov železobetonno go zernovo elevatora. Saratov 1969.
- [85] KUROČKIN A.M., Davlenie zerna w silosach. Issledovanija napriazhenogo sostojanija železobetonnych silosnych sooruzenij, Saratov 1971, s. 84-187.
- [86] KUROČKIN A.M., Vlijanie mestnoj podatlivosti sten silosov na veličinu gorizontálnych davlenij zerna. W: Issledovanija napriazhenogo sostojanija železobetonnych silosnych sooruzenij. Izd. Saratovskogo Universiteta, Saratov 1981.
- [87] LADE P.V., Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. Int. J. Sol. Str. 13, 1977, s. 1019-1035.
- [88] LENCZNER D., An Investigation into the Behaviour of Sand in Model Silo. The Structural Engineer, 12, 1963, vol. 41, pp. 389-399.
- [89] LIGHTFOOD E., SAMAN A., Interaction of Structures with contained Materials. Department of Engineering, Oxford University 1969.
- [90] LUFT E., Druckverhältnisse in Silozellen. Berlin 1920.
- [91] LVIN J.B., Davlenie sypučego tela na stenki silosa. W: Rasčet prostranstvennych konstrukcij. Stroizdat 1970, s. 269-288.
- [92] ŁAPKO A., STACHURSKI W., Określenie sił podłużnych występujących w perforowanych rurach w komorach silosów. Inżynieria i Budownictwo 3, 1979, s. 9-102.
- [93] ŁAPKO A., STACHURSKI W., Doświadczalne określenie efektów działania materiału sypkiego na ściany silosów przy różnym usytuowaniu otworów wysypowych. Inżynieria i Budownictwo 8, 1984, s. 281-285.
- [94] MOTZKUS U., Belastungen von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter. Dissertation TU Braunschweig 1974.
- [95] MRÓZ Z., DRESCHER A., Limit Plasticity Approach to some Cases of Flow of Bulk Solids. J. Eng. Ind. Trans. ASME no 91, 1969, pp. 357-364.

- [96] MRÓZ Z., SZYMAŃSKI C., Gravity Flow of a Granular Material in a Converging Channel. Arch. Mech. Stos. 23, 1971, pp. 897-917.
- [97] MRÓZ Z., SZYMAŃSKI C., Uproszczona teoria przepływu ośrodków rozdrobnionych w kanałach zbieżnych. Arch. Inż. Łąd. 17, 1971, s. 551-578.
- [98] MAJ M., TROCHANOWSKI A., Analiza napięć w zarysowanym silosie na cement. Raport Inst. Bud. PWr., Wrocław 1983, seria PRE nr 29 (praca doktorska).
- [99] MARCINKOWSKI Z., Badania naporu cementu z uwzględnieniem aeracji w silosie cylindrycznym w skali naturalnej. Raporty Inst. Bud. PWr., Wrocław 1971 (praca doktorska).
- [100] MITZEL A., Zbiorniki, zasobniki, silosy, kominy i maszty. Budownictwo betonowe, t. XIII. Arkady, Warszawa 1966.
- [101] MITZEL A., RYBIAŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Eksperymentalne wyznaczanie parcia dynamicznego w silosach na zboże. XIX Konferencja KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1974.
- [102] MITZEL A., RYBIAŃSKI M., ZUBRZYCKI M., Influence of perforated pipes on horizontal pressure in grain silos. W: Sympozjum o silosach, Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 14, Wrocław 1974, s. 91-102.
- [103] MRÓZ Z., DRESCHER A., Limit plasticity approach to some cases of flow of bulk solids. I. Eng. Ind. Trans. ASME, 91, 1969, s. 357-364.
- [104] MRÓZ Z., KWASZCZYŃSKA K., Pewne problemy brzegowe dla ciał rozdrobnionych o wzmocnieniu gęstościowym. Rozprawy Inżynierskie 19, 1971, s. 15-42.
- [105] MURFIT P.G., BRANSBY P.L., Pressures in Hoppers Filled with Fine Powders. International Conference on Design of Silos for Strength and Flow. University of Lancaster, UK 2nd-4th, September 1980.
- [106] NANINGA A., Gibt die übliche Berechnungart der Drücke auf die Wände und den Boden von Silobauten sichere Ergebnisse? Der Ingenieur, H. 44, 1956.
- [107] NIELSEN J., ANDERSEN E.Y., Loads in Grain silos. 11th Working Session of the IASS Committee of Piper and Tanks, Wrocław 1981, W: Aktualne osiągnięcia w dziedzinie budowy silosów, Pr. nauk. Inst. Bud. PWr., nr 39, Wrocław 1983, s. 147-160.
- [108] NIETHAMMER H., TIETZ N., Samen und Früchte des Handels und der Industrie. Junk Verlag, S. Gravenhage 1961.
- [109] NOTHDURFT H., Schüttgutlasten in Silozellen mit Querschnittsverengungen. Dissertation TU Braunschweig, 1976.
- [110] NOWACKI W., DĄBROWSKI R., Silosy, Arkady, Warszawa 1955.
- [111] OHDE J., Zur Erdrucklehre - IV. Der Einfluss der Wandverschiebung auf Gleitflächenform und Erdruckverteilung. Die Bautechnik 29, 1952, H. 2, S. 31-35.
- [112] Opytnoe opredelenie davlenia zerna v silosach elevatora pri Gosmukzavode nr 1 v gorode Baku. Gast I i II, Moskva 1939.
- [113] OROSZ A., Vorschlag zur Berechnung von Silolasten 8. Arbeitssitzung des IASS Komitees. Braunschweig 1977.
- [114] OROSZ A., Thermal Effects in Reinforced Concrete Silos. Civil Engineering nr 3/4, 1978, pp. 125-151.
- [115] PANKRATOVA G.E., O dolgovečnosti żelazobetonnych silosnych sooruzenij, Beton i Żelazobeton 1965, nr 10, s. 24-26.
- [116] PANKRATOVA G.E., NAGAJCEV V.A., Issledovanie davlenij na modeljach silosov novoj konstrukcii. Stroitel'naja Mechanika i Rasčet sooruzenij 6, 1978, s. 14-16.
- [117] PAUL J., Spannungsverteilungen in körnigen kohäsionslosen Haufwerken bei der Lagereung in Behältern. Dissertation TU Braunschweig 1975.
- [118] PESCHL I., Probleme der Silostatik. Haus der Technik - Vortragsveröffentlichungen 386, s. 14-26.
- [119] PIEPER K., MARTENS P., KROLL D., WAGNER K., Silos für Zementkliner, Beton Nr 9, 1970, s. 395-400.

- [120] PIEPER K., Neuere Erkenntnisse über die Belastungen von Silo-konstruktionen. Die Mühle, H. 45, 1964, S. 793-796.
- [121] PIEPER K., MITTELMAN H., WENZEL F., Messungen des horizontalen Getriededruckes in einer 65 m hohen Silozelle. Beton - und Stahl-betonbau, H. 11, 1964.
- [122] PIEPER K., WENZEL F., Erläuterungen zu DIN-1055, Blatt 6: Lastan-nahmen für Bauten, Lasten in Silozellen. Beton - und Stahl-betonbau Nr 5, 1965.
- [123] PIEPER K., Neuere Erkenntnisse über Silolasten. Bergbauwissen - schaften Nr 9, 1966, S. 365-371.
- [124] PIEPER K., Neuere Erkenntnisse über die Beanspruchung von Silobauten. Vorträge auf dem Betontag. Wiesbaden, Deutscher Beton Verein, 1967, S. 383-397.
- [125] PIEPER K., Ermittlung von Materialkonstanten des Füllgutes eines zu Schaden gekommenen Silos und Bericht über die Besichtigung des Schadensfallens. TU Braunschweig 1968.
- [126] PIEPER K., WAGNER K., Der Einfluss verschiedenen Auslaufarten auf die Seitendrucke in Silozellen. Aufbereitungstechnik Nr 10, 1969, S. 542-546.
- [127] PIEPER K., Investigation of Silo Loads in Measuring Models. Jour-nal of Engineering for Industry nr 5, 1969, pp. 365-372.
- [128] PIEPER K., Silolasten. Aufbereitungs - Technik. H. 11, 1978, S. 541-547.
- [129] PLATONOV P.N., Fizyko-mechaničeskie svojstva zerna kak sypučego tela. Pisčevoe mašinostroenie nr 14, 15, 1959.
- [130] PLATONOV P.N., KOVTUN A.P., Davlenie zerna na stenki silosov ele-vatorov. Makomolno-elevatornaja promyšlennost' nr 12, 1959, s. 12-24.
- [131] PLATONOV P.N., BANIT E., Die Durchlassfähigkeit von Auslauföffnun-gen von Silozellen und Bunkern. Die Mühle Nr 8, 1959.
- [132] PLATONOV P.N., IVANOV B.M., ZAMOČENIUK A., O pročnosti i nadežnos-ti železobetonnych zernovych elevatorov. Mukomolno-elevatornaja promyšlennost' nr 5, 1971, s. 36-38.
- [133] PLATONOV P.N., IVANOV B.M., GLUŠKOV V.E., NAUMIENKO N.V., Obobščēnye rezultaty issledovanij dāvlenij zerna v silosach. W: Issle-dovanija napriāženogo sostajanija železobetonnych silosnych soorūženij. Izd. Saratovskogo Universiteta, 1975, s. 64-82.
- [134] PLEINSSNER J., Versuche zur Ermittlung der Boden - und Seitenwand-drucke in Getreidesilos. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure Bd. 50, Nr 23, 25, 1906, S. 976-986.
- [135] PN-84/B-03262: Żelbetowe silosy na zboże. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [136] PRANTE A., Messungen des Getriededruckes gegen Silowandungen. VDI - Zeitschrift, 1896, S. 1122.
- [137] RAWENET J., Überdrucke in Silos mit ausmittig angeordneten Entleerungsöffnungen. Acier-Stahl-Steel Nr 3, 1976, S. 109-116.
- [138] Regles de conception et de calcul des silos en beton arme. SNBATI 1975.
- [139] REIMBERT M.A.: Silosy, teoria i praktyka. Arkady, Warszawa 1959.
- [140] REIMBERT A.M., Silos, Berechnung, Betrieb und Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Silolagerung Landwirtschaftli-cher Güter. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin 1975.
- [141] REIMBERT M., REIMBERT A., Pressure and Overpressure in Vertical Horizontal Silos. International Conference on Design of Silos for Strength and Flow. University of Lancaster, UK 2nd-4th Sep-tember 1980. Copyright Powder Advisory Centre, London 1980.
- [142] RICHARDS P.C., Bunker Design, part 1: Bunker Outlet Design and Measurement of Wall Pressures; Van ZANTEN D.C., MOCIJ A., part 2: Wall Pressures in Mass-Flow; Van ZANTEN D.C., RICHARDS P.C., MOCIJ A., part 3: Wall Pressures and Flow Patterns in Funnel Flow; EWERTS R., Van ZANTEN D.C., RICHARDS P.C., part 4: Recommendations. Transations of the ASME, vol. 99, Serie B, nr 4, Journal of Engi-neering for Industry 11, 1977, s. 809.

- [143] ROBERTS I., On the Pressure of Wheat Stored in Elongated Gells or Bins. Engineering, 1882, p. 399.
- [144] ROBERTS I., Determination of the Vertical and Lateral Pressures of Granular Substances. Proc. of the Royal Society of London, 1884, pp. 225-240.
- [145] RYBIANSKI M., Wpływ smukłości komory na obciążenia w opróżnianych centrycznie i niecentrycznie silosach zbożowych. XXIX konferencja naukowa KILiW PAN - KN PZITB - Krynica 1983, t. II, s. 151-156.
- [146] SAUL R.A., Measurements of Grain Pressures on Bin Walls and Floors. Agricultur Eng. April 1953, pp. 231-234.
- [147] SCHWEDES J., WILMS H., Spannungsverteilung in divergenten Bunkern. Aufbereitungs-Technik H. 11, 1979, S. 603-608.
- [148] SKRAMTAEV B.G., PANFILOVA L.I., Ob ustalosti betona. Stroitel'naja promyšlennost' 3, 1936.
- [149] SN 261-77. Instrukcja po proektirovaniju elevatorov, zernoskladov i drugih predpriyatij, zdaniy i sooruzhenij po obrabotke i chraneniju zerna, Moskva 1977.
- [150] SOKOŁOWSKI W.W., Statyka ośrodków sypkich. PWN, Warszawa 1958.
- [151] STROPPEL A., Spannungszustände in Lagerenden körnigen Hauwerken in der Nähe einer ebenen Wand. VDI - Forschungshaft 525, Düsseldorf 1968.
- [152] SZCZEPANSKI W., Stany graniczne i kinematyka ośrodków sypkich. PWN, Warszawa 1974.
- [153] SZYMAŃSKI C., MRÓZ Z., Analiza procesów mechanicznych w materiale rozdrobnionym w operacjach napełniania i opróżniania kanałów zbieżnych. Prace IPPT, 32/1977.
- [154] TAKAHASKI K., GAMAHARA H., Dynamic Pressure of Grain on Silo Walls. Industrial Report of the Research Laboratory of the Shtamizu Construction Company. Tokyo, April, 1963.
- [155] TERZAGHI K., Die Beziehungen zwischen der Belastung und der Poroziffer der Sande bei verhindeter Seitendehnung, Erdbaumechanik auf Boden physikalischer Grundlage, Leipzig 1925, S. 89-93.
- [156] TGL 32274/09. Lastannahmen für Bauwerke. Lasten für Schüttgüter in Silos und Bunker (DDR Standard - Entwurf Juni 1979).
- [157] THEIMER O.F., Verdichtung bei der Lagerung von Getreide in Silozellen. Die Mühle H. 46, 1964.
- [158] THEIMER O.F., Bersten von Stahlsilos bei tiefen Temperaturen. Berechnungsformeln für Temperaturspannungen. Der Bauingenieur H. 3, 1967, s. 102-105.
- [159] TRUCHLOV A.M., Sovmestnaja rabota stenok i zernovoj masy. Davlenie sypuchich materialov v silosach i bunkerach. CINTI Goskomzaga SSR, Moskva 1969.
- [160] WAGNER K., Probleme des Silodruckes. Dissertation TU Braunschweig 1971.
- [161] WENZEL F., Druckverhältnisse in Silozellen. Dissertation TU Braunschweig 1963.
- [162] WENZEL F., Untersuchungen über die Druckverhältnisse in Silozellen. TU Braunschweig 1964.
- [163] WOLKER D.M., An approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers. Chem. Engng. Sc., vol. 21, 1966, pp. 975-997.
- [164] WOL-GAJEWSKA B., Zastosowanie związków teorii plastyczności do analizy nieustalonego wpływu ośrodków sypkich ze zbiorników. Prace IPPT nr 28, 1978.
- [165] ZAWIDZKI J., Ustalony, dynamiczny grawitacyjny wpływ ośrodków sypkich, Prace IPPT nr 11, 1971.

Praca wpłynęła do Redakcji 1986.04.21

THE STUDY OF THE PRESSURES EXERTED COHESIONLESS BULK SOLIDS ON THE WALLS OF A CONTAINING VESSEL (SILO)

Theoretical and experimental results of the pressures exerted by cohesionless bulk solids on the walls of silos are presented. The purpose of this paper was to determine the effect of different parameters on the distribution and values of the pressure acting on the floor and the walls of silos during filling and emptying.

Author's own studies on model and full-size silos are compared with the results of other studies.

The obtained results pointed out to the fact that the values and the distribution of pressure in a silo depend on a number of parameters which in a greater part of theoretical works have been left out of account.

The author studied such parameters as: vertical and horizontal cross-section of a silo chamber, kind of solid stored, rigidity of walls and floor construction, roughness of inner surfaces of the walls. Besides, some service conditions were studied, i.e., the way of charging of a solid into a silo, location of outlet gates, rate of charging/discharging of a silo, etc.

Moreover, dynamic changes in the solid pressure were shown to have a negative effect on the load-carrying ability and service conditions of a reinforced concrete silo. Also, author's own suggestions concerning the determination of the distribution and values of a solid pressure in nonsymmetrically discharged silos are presented.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПОРА БЕСКОГЕЗИОННЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СИЛОСАХ

Работа охватывает результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействия сыпучих материалов в силосах. Целью работы является определение влияния различных параметров на распределение и значение напора, действующего на дно и стены силосов во время их наполнения и опораживания.

На фоне осуществлённых до сих пор исследований представлены также результаты собственных измерений, произведённых на моделях и объектах в натуральном масштабе.

Результаты проведённых исследований доказали, что значение и распределение напора в силосах зависит от большого количества параметров, в большинстве случаев не учитываемых в теоретических решениях.

Описание в работе исследования охватывали влияние таких параметров, как: вид сыпучего материала форма горизонтального и вертикального разряда камеры, жёсткость конструкции стен и дна, шероховатость внутренних поверхностей стен, а также некоторые условия эксплуатации, например, способ наполнения силоса, расположение выпускных отверстий, интенсивность загрузки и отбора сыпучего материала в несимметрично опоражниваемых силосах.

Результаты измерений сопоставлены с применяемыми на практике теоретическими решениями (например, Дженнике и Дрешера). В работе приведены также собственные предложения определения напора сыпучих материалов в силосах сходных, в камерах концентрических силосов, в силосах с податливой конструкцией стены или дна, а также в камерах с нецентрическим выходом.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	3
1. Wstęp	3
2. Cel i zakres pracy	6
3. Podstawy teoretyczne wyznaczenia naporu materiału sypkiego w silosach	7
3.1. Funkcja naporu	7
3.2. Modele matematyczne wykorzystywane do opisu cech mechanicznych materiału sypkiego	9
3.3. Stan naprężeń w materiale sypkim	10
3.4. Omówienie wybranych metod wyznaczania naporu materiału sypkiego	16
3.5. Uwagi i wnioski	33
4. Badania wpływu wybranych parametrów konstrukcji silosów i warunków ich eksploatacji na wartość i rozkład naporu materiału sypkiego	34
4.1. Wstęp	34
4.2. Smukłość komór	34
4.2.1. Analiza dotychczasowych wyników wybranych badań	34
4.2.2. Wpływ smukłości komory silosu na napór materiału sypkiego w świetle aktualnych przepisów normowych	39
4.2.3. Wyniki badań własnych	42
4.3. Kształt komór	63
4.3.1. Kształt przekroju poziomego komór	63
4.3.2. Pochylenie ścian komory	66
4.3.2.1. Wyniki badań eksperymentalnych	66
4.3.2.2. Teoretyczne wyznaczenie obciążeń w silosie zbieżnym ku górze	70
4.3.3. Pochylenie ścian leja	75
4.4. Szorstkość ścian komory	79
4.5. Podatność ścian i dna	84
4.5.1. Wyniki badań eksperymentalnych	84
4.5.2. Wyniki badań własnych	97
4.5.3. Uogólnienie wyników badań własnych	108
4.5.4. Rozwiązania teoretyczne uwzględniające przemieszczenia poziome ścian	112
4.5.4.1. Napór bierny wywołany skutkiem obniżenia zewnętrznej temperatury	112
4.5.4.2. Napór czynny materiału sypkiego w silosach z podatnymi ścianami	119

4.6. Sposób napełniania komory	120
4.6.1. Wyniki dotychczas zrealizowanych badań	120
4.6.2. Wyniki badań własnych i ich analiza	125
4.7. Intensywność napełniania i opróżniania	133
4.8. Wpływ jednoczesnego napełniania i opróżniania	137
4.9. Uwagi i wnioski	141
5. Opróżnianie niesymetryczne silosów	143
5.1. Wstęp	143
5.2. Napór poziomy materiału sypkiego w silosach opróżnianych niesymetrycznie w ujęciu normowym	143
5.3. Wyniki dodatkowych badań własnych	147
5.3.1. Opis badań	147
5.3.2. Napór pszenicy	148
5.3.3. Napór cukru	150
5.3.4. Wnioski	159
5.4. Analiza wybranych wyników badań eksperymentalnych	159
5.4.1. Zestawienie badań	159
5.4.2. Wyniki badań	162
5.4.2.1. Badania naporu pszenicy	162
5.4.2.2. Badania naporu jęczmienia	164
5.4.2.3. Badania naporu innych gatunków zbóż	167
5.4.2.4. Badania naporu cukru	167
5.4.2.5. Badania naporu sypkich materiałów nieorga- nicznych	167
5.4.3. Jakościowa i ilościowa ocena wyników analizowanych badań	169
5.5. Zjawiska warstwowego spływu zboża	174
5.6. Propozycje ekwiwalentnych schematów obciążeń	176
5.6.1. Propozycja Piepera	176
5.6.2. Propozycja Gopalekrishnana	180
5.6.3. Propozycja Peschla	180
5.6.4. Propozycja autora	180
5.7. Uwagi i wnioski	184
6. Napór materiału sypkiego w silosie typu koncentrycznego	185
6.1. Wstęp	185
6.2. Przegląd wybranych wyników badań eksperymentalnych	186
6.3. Badania własne	189
6.3.1. Opis badań	189
6.3.2. Wyniki pomiarów	192
6.3.3. Uogólnienie wyników badań eksperymentalnych	207
6.3.4. Porównanie rozwiązania teoretycznego z wynikami ba- dań eksperymentalnych	211

6.4. Wnioski	214
7. Wpływ oddziaływań dynamicznych materiału sypkiego na konstrukcyjną niezawodność silosów żelbetowych	215
7.1. Wstęp	215
7.2. Czynniki decydujące o niezawodności konstrukcji silosów ...	215
7.3. Badanie zmian dynamicznych naporu i odkształceń ścian w silosach	217
7.3.1. Pulsacja naporu	217
7.3.2. Pomiary odkształceń ścian i naprężeń w zbrojeniu silosów	220
7.4. Wpływ obciążeń wielokrotnie zmiennych na wytrzymałość żelbetowych ścian silosów	231
7.5. Uwagi i wnioski	236
8. Podsumowanie	237
Literatura	239

CONTENTS

1. Introduction	5
2. The objectives and scope of the work	6
3. Theoretical bases for determining the bulk solid pressure in silos	7
3.1. Pressure function	7
3.2. Mathematical models used for the description of mechanical properties of a bulk solid	9
3.3. State of stress in a bulk solid	10
3.4. Discussion of the chosen methods for determining the pressure of a bulk solid	16
3.5. Conclusions	33
4. Studying the effect of some chosen parameters concerning the structure of silos and their service conditions on the value and distribution of bulk solid pressure	34
4.1. Introduction	34
4.2. Slenderness ratio of chambers	34
4.2.1. The analysis of the results of some chosen studies	34
4.2.2. The effect of the slenderness ratio of a silo chamber on the bulk solid pressure in the light of the operative codes and standards	39
4.2.3. Results of the author's own studies	42
4.3. Shape of chambers	63
4.3.1. Shape of the chamber cross-section	63

4.3.2. Chamber walls inclination	66
4.3.2.1. Experimental results	66
4.3.2.2. Theoretical calculations of pressures acting on the walls of a silo converging towards the top	70
4.3.3. Hopper walls steepness	75
4.4. Roughness of chamber walls	79
4.5. Floor and walls flexibility	84
4.5.1. Experimental results	84
4.5.2. The results of the author's own studies	97
4.5.3. Generalization of the author's own results	108
4.5.4. Theoretical solutions making allowances for horizon- tal displacements of the walls	112
4.5.4.1. Passive pressure due to temperature drop outside the silo	112
4.5.4.2. Active pressure of a bulk solid in silos with flexible walls	119
4.6. Method of filling of the chamber	120
4.6.1. The results of the hitherto carried studies	120
4.6.2. The results of the author's own studies - analysis	125
4.7. Rate of filling and discharging	133
4.8. The effect of a simultaneous filling and discharging	137
4.9. Conclusions	141
5. Non-symmetric discharging of silos	143
5.1. Introduction	143
5.2. Bulk solid horizontal pressure in non-symmetrically dis- charged silos vs. operative norms and standards	143
5.3. The results of additional studies by the author	147
5.3.1. Description of the studies	147
5.3.2. Wheat pressure	148
5.3.3. Sugar pressure	150
5.3.4. Conclusions	159
5.4. The analysis of some chosen experimental results	159
5.4.1. List of experiments made	159
5.4.2. Results of studies	162
5.4.2.1. Studies on wheat pressure	162
5.4.2.2. Studies on barley pressure	164
5.4.2.3. Studies on other species of corn	167
5.4.2.4. Studies on sugar pressure	167
5.4.2.5. Studies on inorganic bulk solids pressure	167
5.4.3. Qualitative and quantitative evaluation of the expe- rimental results obtained	169

	253
5.5. The effect of a laminar corn flow off	174
5.6. Equivalent diagrams of loads - proposals	176
5.6.1. Pieper's proposal	176
5.6.2. Peschl's proposal	180
5.6.3. Gopalakrishnan's proposal	180
5.6.4. Author's own proposal	180
5.7. Conclusions	184
6. Bulk solid pressure in a concentric silo	185
6.1. Introduction	185
6.2. Review of some chosen experimental studies	186
6.3. Author's own studies	189
6.3.1. Description of the studies	189
6.3.2. Measurement results	192
6.3.3. Generalization of the experimental results	207
6.3.4. Comparison of theoretical solution with experimental results	211
6.4. Conclusions	214
7. The influence of dynamic effects of a bulk solid on the structural reliability of reinforced concrete silos	215
7.1. Introduction	215
7.2. Factors determining the reliability of silos structure	215
7.3. Studies on dynamic variations of pressure and wall deforma- tions	217
7.3.1. Pressure fluctuation	217
7.3.2. Measurements of wall deformations and pressures in the reinforcing elements of a silo	220
7.4. The effect of repeatedly changing loads on the strength of reinforced concrete silo walls	231
7.5. Conclusions	236

87-2
Instytut Badawczy
Kultury i Sztuki

3848 BI-2

2187 m/4

Cena zł 185,—

Subscription should be sent (at any time of the year) to:

"Ars Polona"

**Krakowskie Przedmieście 7, 00-068 Warszawa
or OR PAN, 00-901 Warszawa, PKiN, POLAND**

Bank account number: NBP, VIII OM Nr 1550-6-81574 Warszawa/Poland

**Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
ma stałe na składzie Księgarnia Wr 49
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
oraz Wojewódzka Księgarnia Techniczna
ul. Świdnicka 8, 50-067 Wrocław**

ISSN 0324-9875