

7.74 — ośrodki sypkie, ziarniste
i rozdrobnione

L. Dietrich, W. Trąmpczyński

**DOŚWIADCZALNE METODY
WYZNACZANIA PARC
OSRODKÓW SYPKICH W SILOSACH**

45/1988

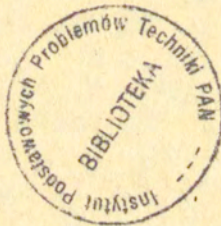
P. 269



WARSZAWA 1988

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 28 czerwca 1988 r.



56747



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 170 egz. Ark.wyd. 5,26 Ark.druk. 7,5
Oddano do drukarni we wrześniu 1988 r.
Nr zamówienia 526/88

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

DOŚWIADCZALNE METODY WYZNACZANIA PARC OSRODKÓW SYPKICH W SILOSACH

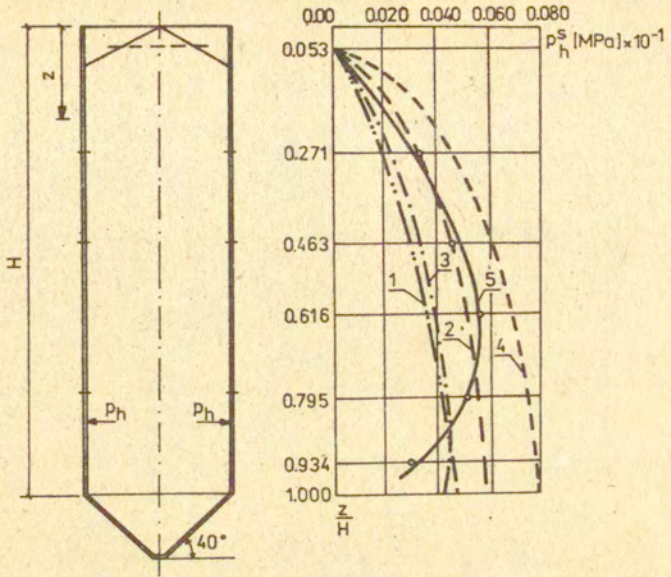
1. Wstęp

Podstawą projektowania silosów jest znajomość rozkładu naporu przechowywanego ośrodka sypkiego na jego ścianki. Stosowane w tym względzie przepisy normowe oparte są w większości na uproszczonej teorii Janssena z 1895 roku [1] opisanej w każdej monografii z tej dziedziny [2,3,4]. Rozkład składowej poziomej naprężenia działającego na ściankę silosu, przedstawiony jako funkcja wysokości zalogającego ośrodka ziarnistego, zależy od średnicy zbiornika, ciężaru objętościowego materiału ziarnistego i jego współczynnika tarcia o ścianki zbiornika oraz założonej, stałej na całej wysokości zbiornika, wartości stosunku składowej pionowej naprężenia do poziomej. W przypadku gdy do wyznaczenia wartości tej stałej przyjmie się, że następuje uplastycznienie ośrodka ziarnistego przy ściance silosu lub w jego środku musimy znać postać warunku plastyczności i wartości występujących w nim stałych materiałowych. Jeśli uplastycznienie ośrodka ziarnistego opisane jest warunkiem Coulomba-Mohra bez kohezji to jedyną stałą materiałową jest kąt tarcia wewnętrzznego. Tak więc do wyznaczenia, według teorii Janssena, rozkładu naprężeń działających na ścianki silosu musimy znać:

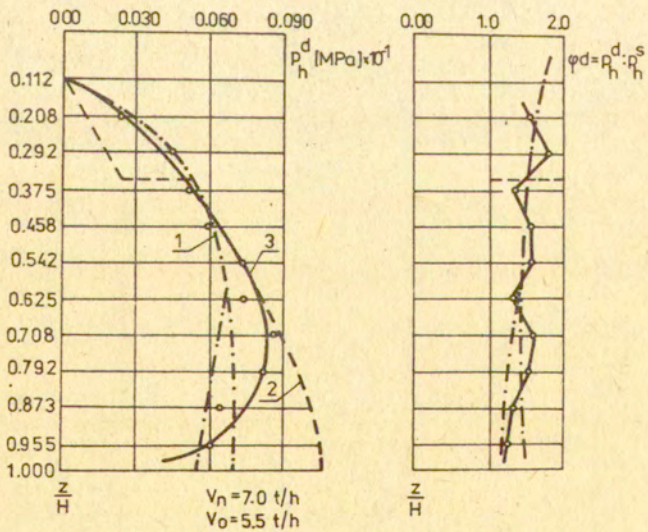
1. postać warunku uplastycznienia ośrodka ziarnistego przechowywanego w silosie,
2. wartości stałych materiałowych występujących w warunku uplastycznienia,
3. ciężar objętościowy ośrodka ziarnistego,
4. wartość współczynnika tarcia materiału ziarnistego o ścianki silosu,
5. wymiary geometryczne silosu.

Mechaniczne właściwości ośrodka ziarnistego i parametry konstrukcyjne silosu umożliwiają obliczenie rozkładu naprężeń na jego ścianki, który stanowi punkt wyjścia dla obliczeń wytrzymałościowych konstrukcji silosu. Określony w ten sposób rozkład parcia ośrodka ziarnistego jest parciem statycznym. Zaproponowane przez Janssena wzory rozkładu naprężeń poziomych i pionowych wzdłuż wysokości silosu wynikające z przyjętych założeń upraszczających były wielokrotnie modyfikowane. W monografii Kamińskiego i Zubrzyckiego [5] podano 29 różnych, proponowanych w literaturze i przepisach normowych, odmian tych wzorów. W niektórych przypadkach ich postać wynika z przyjęcia odmiennych od stosowanych przez Janssena uproszczeń, w innych natomiast dobierano postać wzorów końcowych tak, żeby uzyskać dobrą zgodność z wynikami konkretnych badań doświadczalnych. Liczbowe różnice między tymi propozycjami są znaczne. Ilustruje to rysunek 1 [5] przedstawiający rozkład statycznego parcia poziomego ośrodka sypkiego (pszenicy) na żelbetowe ścianki silosu (modelu o średnicy 1,25 m i wysokości komory 3,77 m) dla czterech propozycji teoretycznych: Janssena (1), braci Reimbert (2), Fröhlicha (4) i wg normy niemieckiej (3). Zaznaczone kółeczkami punkty doświadczalne przedstawiają wartości poziomego naporu zmierzone przy pomocy pięciu czujników ciśnień umieszczonych na różnych wysokościach. Punkty doświadczalne określone leżą między skrajnymi przewidywaniami obliczeń (poza punktem dolnym), ale charakter krzywej doświadczalnej (5) jest inny niż krzywych teoretycznych.

Istotną komplikacją przy wyznaczaniu obciążeń działających na ścianki silosów jest obserwowane doświadczalnie zwiększenie wartości parcia ośrodka sypkiego w momencie jego opróżniania. Zmierzone w trakcie ruchu ośrodka sypkiego jego parcie na ścianki silosu określane jest jako parcie dynamiczne. Jego wartość oblicza się, zgodnie z zaleceniami normowymi, przyjmując współczynnik dynamiczny φ_d definiowany jako stosunek wartości parcia w momencie ruchu ośrodka sypkiego p_h^d do wartości parcia statycznego p_h^e . Norma niemiecka (DIN-1055) określa wartość φ_d w granicach od 1,3 do 1,5. Norma radziecka (SN 302-65) określa wartość $\varphi_d=1$ dla 1/3 górnej wysokości silosu oraz $\varphi_d=2$ dla pozostałych 2/3 wysokości silosu. Rozkład poziomego parcia dynamicznego wzdłuż



Rys. 1



Rys. 2

wysokości ścianki silosu pokazano na rys.2 dla tych dwóch norm (1-DIN, 2-SN). Kółeczkami zaznaczono wartości doświadczalne zmierzone przy pomocy czujników umieszczonych w dziewięciu miejscach na różnych wysokościach silosu o średnicy 1,25 m i wysokości 3,77 m, wykonanego z prefabrykatów żelbetowych [5] i zasypanego pszenicą. Pomierzone wartości naporu dynamicznego (wykres 3) w górnej strefie silosu zgadzają się z rozkładem obliczeniowym zalecanym według normy niemieckiej. Natomiast w dolnej strefie leżą pomiędzy przewidywanymi wartościami normy radzieckiej i niemieckiej. Różnice wartości współczynników dynamicznych otrzymane w różnych badaniach są stosunkowo duże. W pracach [6,7,8] wartość tego współczynnika określono na 1,5, natomiast w pracy [9] na 1,65. W pracy [10] otrzymano wartość 1,9. Wyniki badań zamieszczone w monografii [3] określają tę wartość na 2,4, a w pracy [11] na 3,2.

Rezultaty badań doświadczalnych przeprowadzonych przez różnych autorów wskazują, że rozkład statycznego i dynamicznego naporu zależy od całego szeregu czynników takich jak:

- właściwości fizykomechaniczne materiału sypkiego,
- proporcji geometrycznych zbiornika i odchyłek w jego wykonaniu,
- kąta pochylenia ścian zbiornika,
- kształtu leja wysypowego,
- sztywności konstrukcji silosu,
- sposobu napełniania zbiornika (np. napełnianie strugą lub deszczem),
- sposobu opróżniania zbiornika (symetryczne bądź niesymetryczne),
- kinematyki ruchu ośrodka sypkiego związanej z konstrukcją i proporcjami silosu oraz właściwościami ośrodka sypkiego (przepływ pełny bądź rdzeniowy).

Jeśli uwzględnić jeszcze, że wyniki pomiarów parcia ośrodka ziarnistego na ścianki silosu mogą dodatkowo zależeć od:

- zastosowanej metody pomiarowej (np. pomiar lokalny przy pomocy czujnika względnie pomiar uśredniony z większej powierzchni ściany silosu),
- rodzaju czujnika (jego proporcji wymiarowych, sztywności),
- sposobu zainstalowania czujników w ścianie silosu,

- interpretacji wartości mierzonych jako funkcje czasu, wówczas rozbieżności wyników różnych prac można traktować jako wpływ różnorodnych parametrów. W przypadku przeprowadzania badań na obiektach rzeczywistych większość z tych parametrów ma ustalone wartości i nie jest możliwe doświadczalne określenie ich wpływu na mierzone wartości parcia ośrodka ziarnistego na ścianki silosu. W przypadku natomiast przeprowadzania badań na modelach silosów wykonanych w laboratoriach w mniejszej skali istnieje możliwość kontrolowania wartości wielu parametrów i tym samym możemy ocenić ich wpływ na wyniki pomiarów. Przeniesienie jednak wyników otrzymanych na modelach na obiekty rzeczywiste, jak to ma miejsce w wielu innych dziedzinach przy zachowaniu prawa podobieństwa modelowego, w tym przypadku, ze względu na złożoną, nieliniową charakterystykę właściwości mechanicznych ośrodków ziarnistych nastręcza zasadnicze trudności. Dlatego też rezultaty badań doświadczalnych przeprowadzanych w skali laboratoryjnej na modelach silosów wykorzystuje się do weryfikacji propozycji teoretycznych i analizy wpływu różnych czynników na parcie ośrodka ziarnistego na ścianki silosu.

Uzyskanie rozwiązań problemu składowania i przemieszczania ośrodków ziarnistych w silosach nastręcza ogromne trudności związane z modelem matematycznym ośrodków ziarnistych, określeniem warunków brzegowych i metodą rozwiązania wyjściowego układu równań różniczkowych. Mimo więc mnogości różnych propozycji teoretycznych i zależności empirycznych wyznaczenie rozkładu naprężeń i kinematyki przepływu ośrodków ziarnistych przechowywanych w silosach jest wciąż sprawą otwartą. Badania doświadczalne odgrywają więc, w tej dziedzinie rolę szczególną. Stanowią podstawę analizy różnych czynników na zachowanie się tych ośrodków, umożliwiając następnie modyfikację starych i wprowadzenie nowych zależności teoretycznych. Z drugiej natomiast strony stanowią podstawę weryfikacji przyjętych założeń upraszczających czy postaci konkretnych funkcji rozkładu naprężeń bądź prędkości płynięcia. Postęp w zakresie teoretycznego opisu zachowania się ośrodków ziarnistych przechowywanych w silosach, który umożliwia ich bezpieczniejsze i oszczędniejsze projektowanie, jest więc ściśle uwarunkowany wynikami badań doświadczalnych i wiąże się z rozwojem techniki doświadczalnej.

Badania doświadczalne związane z projektowaniem silosów można podzielić na następujące grupy:

1. badania właściwości fizykomechanicznych ośrodków ziarnistych przechowywanych w silosach,
2. badania kinematyki przepływu ośrodków ziarnistych w silosach,
3. badania kierunku i wartości parcia ośrodków ziarnistych na ścianki silosu przy pomocy specjalnych czujników (bezpośrednie metody wyznaczania parcia),
4. badania reakcji konstrukcji silosu wywołanej parciem ośrodków ziarnistych, skąd można pośrednio wyznaczyć parcie ośrodka na ścianki silosu,
5. badania wartości składowych naprężenia przy pomocy specjalnych sond umieszczonych w ośrodku ziarnistym przechowywanym w silosie.

Badania pierwszej grupy dotyczą wyznaczania stałych i funkcji materiałowych występujących w opisach teoretycznych jak i określenia zachowania się materiałów ziarnistych w różnych warunkach i różnych stanach naprężenia umożliwiając sprecyzowanie równań konstytutywnych dla tych materiałów. Badania tego rodzaju przeprowadza się w warunkach laboratoryjnych na specjalnych urządzeniach (aparata bezpośredniego ścinania, aparat wszechstronnego ściskania itp.). Jest to wyodrębniona grupa doświadczeń i nie będzie rozpatrywana w dalszej części pracy.

Badania drugiej grupy przeprowadzane są zwykle na specjalnych modelach silosów wykonanych w taki sposób, żeby umożliwić bezpośrednią obserwację przemieszczeń poszczególnych cząstek ośrodków ziarnistych. Znane są również pojedyncze prace [12], w których do obserwacji kinematyki ośrodków ziarnistych wykorzystywano technikę prześwietlania modelu promieniami Roentgena. Materiał ziarnisty był spreparowany w ten sposób, że układano w pewnych odstępach warstwy o ziarnach powlekanych tlenkiem ołowiu.

Badania kinematyki umożliwiają ocenę poprawności przyjętych założeń upraszczających oraz weryfikację i modyfikację opisu teoretycznego. W tych przypadkach gdy jest to opis kompletny obejmujący zarówno statykę jak i kinematykę badania te pośrednio umożliwiają również ocenę poprawności obliczonego stanu naprężenia. Znajomość pola kinematycznego nie wystarcza jednak do

wyznaczenia stanu naprężenia, czy weryfikacji zależności określających stan naprężenia na podstawie rozważań statyki (jak to ma miejsce np. w teorii Janssena). Z tych też względów doświadczalne badania kinematyki ośrodków ziarnistych w silosach traktuje się raczej jako element badań podstawowych w tej dziedzinie, który ma mniejsze znaczenie w testach technicznych bezpośrednio związanych z projektowaniem i eksploatacją silosów. Doświadczenia należące do tej grupy nie będą omawiane w niniejszej pracy.

W dalszej części tego opracowania przedyskutowane będą stosowane metody i otrzymane wyniki doświadczeń należących do trzeciej, czwartej i piątej grupy podanego wyżej podziału. Bezpośrednim celem tych trzech grup badań doświadczalnych jest wyznaczenie stanu naprężenia w określonych miejscach ośrodka ziarnistego przechowywanego i przemieszczanego w silosach. Kolejno omówiona będzie najliczniej reprezentowana w literaturze światowej grupa trzecia prac z tej dziedziny, w których mierzy się bezpośrednio parcie ośrodka na ścianki silosu przy pomocy specjalnych czujników.

Następna grupa czwarta badań to prace poświęcone pośredniemu wyznaczaniu parcia materiału ziarnistego poprzez pomiary odkształceń elementów konstrukcji silosu. Badania takie są łatwiejsze z technicznego punktu widzenia od pomiarów poprzedniej grupy wymagających budowy i instalacji specjalnych czujników. Ich interpretacja jest jednak znacznie trudniejsza i wymaga przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej konstrukcji silosu.

W ostatniej grupie piątej badań doświadczalnych omówione będą podejmowane próby mierzenia składowych stanu naprężenia przy pomocy czujników specjalnej konstrukcji, które umieszczone są w określonych miejscach w ośrodku ziarnistym. Doświadczenia takie są trudne do przeprowadzenia, a umieszczenie czujnika może powodować lokalne zakłócenia w polu naprężenia, co dodatkowo komplikuje interpretację wyników. Badania należące do tej grupy są bardzo skromnie reprezentowane w literaturze naukowej, ale niewątpliwie zasługują na uwagę. Należy uznać je jednak za perspektywiczne z naukowego punktu widzenia, a ich dalszy rozwój jest uwarunkowany rozwojem techniki doświadczalnej.

2. Doświadczalne wyznaczanie parć osrodków ziarnistych na ścianę silosu przez pomiar bezpośredni

Bezpośrednie metody pomiaru obciążeń silosu wywołanych parciem znajdującego się w nim materiału były stosowane przez autorów większości opublikowanych z tej dziedziny prac. Metody te różniące się między sobą technicznymi rozwiązaniami aparatury pomiarowej mają jedną wspólną cechę. Obciążenia działające na ściany lub dno silosu mierzone są przy pomocy wbudowanych czujników wyskalowanych w jednostkach ciśnienia. Pomiary naprężeń przy pomocy czujników stosowane są od dawna w różnych procesach i dla różnych materiałów. Wykorzystuje się je do wyznaczania naprężeń kontaktowych między narzędziami i metalem w trakcie jego przeróbki plastycznej, do pomiarów naprężeń w gruntach oraz w osrodkach sypkich i ziarnistych przechowywanych w silosach. W każdym z tych przypadków konstrukcja czujnika i jego zakres pomiarowy są indywidualnie dobierane do rozpatrywanego procesu natomiast zasady pomiaru są podobne. Można, stosując ogólny podział, wyodrębnić trzy grupy czujników: pneumatyczne, hydrauliczne i elektryczne. Mechaniczna część konstrukcji czujnika musi być dostosowana nie tylko do zamocowania w badanej konstrukcji, ale musi zapewnić prawidłowe działanie urządzenia we współpracy z danym osrodkiem sypkim. Warunki jakie powinien spełniać czujnik do pomiaru parć osrodków sypkich na ścianki silosu ustalane były empirycznie na podstawie oceny otrzymywanych wyników przez różnych autorów. Zestawienia tych warunków podawane w pracach o charakterze przeglądowym [5,13,14] obejmują:

- średnica czujnika powinna być dobrana w zależności od wielkości ziaren badanego osrodka, czujniki zbyt małe dają nam pomiar lokalny (np. w przypadku kontaktu z jednym ziarnem), czujnik zbyt duży będzie mierzył średnią wartość dla całej powierzchni,
- sztywność czujnika powinna być zbliżona do sztywności ścian silosu,
- ugięcia membrany powinny być dostatecznie małe, moduł sprężystości czujnika związany z ugięciem powinien być większy od modułu sprężystości osrodka sypkiego,
- współczynnik tarcia materiału sypkiego o membranę czujnika

- powinien mieć podobną wartość jak na ściankach silosu,
- powierzchnia zamocowanego czujnika powinna pokrywać się z powierzchnią silosu,
- konstrukcja czujnika musi zapewniać kompensację możliwych zmian temperatury.

Wpływ różnych cech konstrukcyjnych czujników do pomiaru naprężeń w gruntach analizowano szczegółowo w pracy [15]. Natomiast teoretyczną analizę błędów pomiarowych związanych z wymiarami i sztywnością czujnika zanurzonego w gruncie analizowano w pracy [16] przedstawiając następującą zależność:

$$\frac{p_c}{p} = \frac{B}{2 \cdot D} \cdot \left[\frac{\frac{N}{E_g} - \frac{N}{E_c}}{1 + \frac{B}{2 \cdot D} \cdot \frac{N}{E_c}} \right]$$

gdzie: p - naprężenie działające w gruncie,

p_c - dodatkowa wartość naprężenia wynikająca z konstrukcji czujnika (zmierzona wartość jest $p + p_c$),

B - grubość czujnika,

D - średnica czujnika,

N - stała materiałowa gruntu,

E_g - moduł sprężystości gruntu,

E_c - moduł sprężystości czujnika.

Przyjmując, że dla danych warunków pomiarów mamy $N/E_g = K = \text{const}$ dostaniemy:

$$\frac{p_c}{p} = \frac{B}{2 \cdot D} \cdot \left[\frac{K \left(1 - \frac{E_g}{E_c} \right)}{1 + \frac{B}{2 \cdot D} \cdot \frac{E_g}{E_c} \cdot K} \right],$$

gdzie wyrażenie w nawiasach kwadratowych dąży do K gdy stosunek E_c/E_g dąży do nieskończoności i jest niezależne od stosunku B/D przy założeniu, że B/D i E_g/E_c są małe. Możemy wówczas wyrażenie w nawiasie wyrazić przez wartość współczynnika C_A (zależnego od kształtu czujnika). Ostatecznie dostaniemy, że względny błąd wynosi:

$$\frac{p_c}{p} = C_A \cdot \frac{B}{D}$$

Wykres względnego błędu pomiarów ciśnień w gruncie jako funkcji stosunku B/D dla różnych wartości E_c/E_g przy założeniu $N/E_g = 1$ pokazano na rysunku 3. Dla wartości $B/D < 0,5$ względny błąd zmienia się prawie liniowo z wartością B/D .

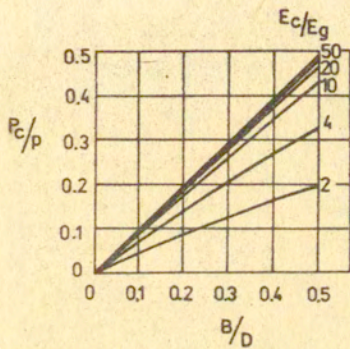
Analizę wpływu czujnika zanurzonego w gruncie na dystrybucję naprężeń w jego otoczeniu przedstawiono w pracy [17], przy założeniu, że czujnik umieszczony jest w nieskończonym ośrodku sprężystym. Rozkład naprężeń dla różnych stosunków E_c/E_g przy stałej wartości $B/D = 0,1$ i liczby Poissona $\nu = 0,2$ przedstawiono na rysunku 4.

Z zacytowanych wyżej rozważań wynika, że w przypadku pomiaru naprężeń w gruntach przy pomocy czujników:

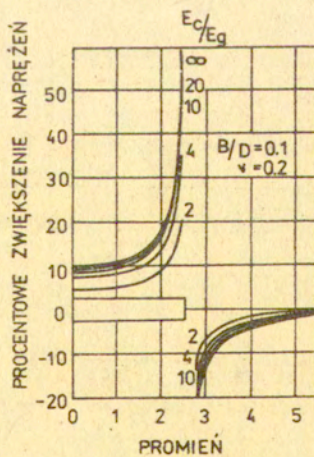
- względny błąd pomiaru dla danych warunków jest bezpośrednio zależny od stosunku B/D i może być wyrażony w podanej wyżej formie przy pomocy współczynnika C_A ,
- współczynnik C_A jest funkcją stosunku modułów E_c/E_g i jego wartość wzrasta (a więc wzrasta i względny błąd) ze wzrostem tego stosunku, wartość współczynnika C_A , jak to pokazano na rysunku 5, jest w przybliżeniu stała dla $E_c/E_g > 10$, dla danego stosunku czynnej i całkowitej powierzchni czujnika,
- współczynnik C_A jest, dla danej wartości E_c/E_g , funkcją stosunku powierzchni czynnej (A_1) czujnika do całkowitej (A_2) (rys.6), efekt ten wynika z niejednorodnego rozkładu nacisków na powierzchnię celi.

Analizę powyższą przeprowadzono przy założeniu, że materiał jest izotropowy, sprężysty i jednorodny oraz, że przenosi nieskończenie duże naprężenia. Wyciągnięte wnioski są więc niezależne od poziomu naprężenia i czasu jego działania. Ponieważ zachowanie się rzeczywistych gruntów nie pokrywa się z przyjętym modelem należy uzyskane rezultaty traktować jako wskazówki przy konstruowaniu czujników i planowaniu programu badań weryfikujących przyjęte założenia. Weryfikacja doświadczalna [15] przeprowadzona dla membranowych czujników tensometrycznych (rys.7) umieszczonych w glinie i piasku potwierdziła, że:

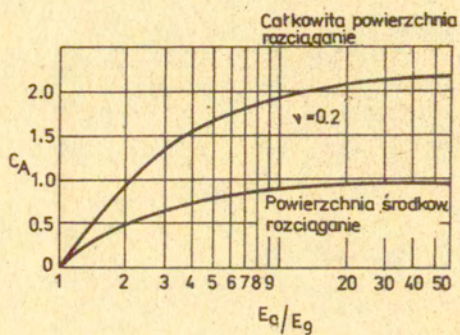
- błąd odczytu zależy bezpośrednio od stosunku grubości do średnicy czujnika, wartość tego stosunku powinna być jak najmniejsza, stosunek odczytu z danego czujnika do odczytu z czujnika najcięższego z badanych (p_c/p_{c1}) przedstawiono na



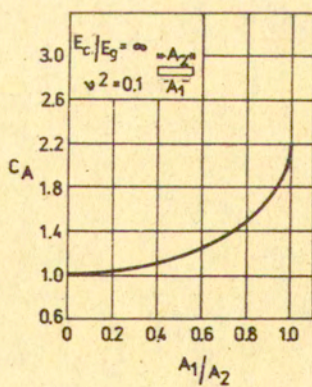
Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5



Rys. 6

rys.8 jako funkcję obciążenia,

- względny błąd pomiaru zależy od stosunku czynnej i całkowitej powierzchni czujnika, wyniki badań dla trzech ośrodków przedstawiono na rys.9, przy średnicy czujnika 75 mm zaleca się średnicę czynną mniejszą od 25 mm,
- błąd spowodowany różnicą modułów sprężystości gruntu E_g i czujnika E_c jest stosunkowo niewielki (rys.10), czujnik powinien być sztywny i nieściśliwy, a stosunek modułów E_c/E_g powinien przekraczać 10.

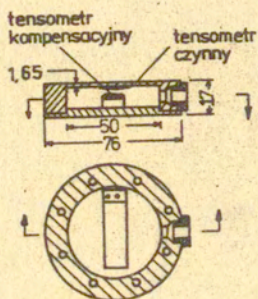
Względny błąd odczytu czujników przy spełnieniu dwóch ostatnich warunków można określić jako:

$$\frac{P_c}{P} = 1,2 \cdot \frac{B}{D}.$$

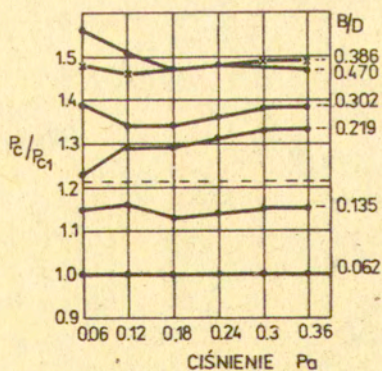
Z analizy względnego błęd pomiarowego dla czujnika o średnicy D , grubości B i module sprężystości E_c umieszczonego w sprężystej ścianie o module E_s , na której działa parcie ośrodka sypkiego charakteryzującego się modulem sprężystości E_g wynika [18], że wartość tego błęd można wyrazić w postaci:

$$\frac{P_c}{P} = \frac{\frac{E_g}{E_s} - \frac{E_g}{E_c}}{\frac{\pi \cdot D \cdot (1 - \mu_g^2)}{4 \cdot B} + \frac{E_g}{E_c}},$$

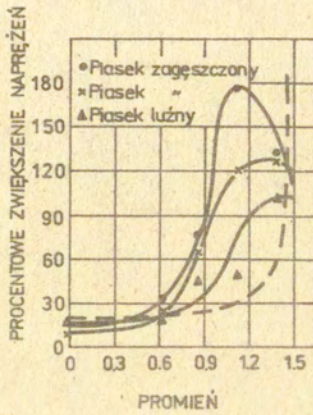
gdzie μ_g jest współczynnikiem Poissona dla ośrodka sypkiego. Względny błąd wskazań czujnika zwiększa się ze wzrostem różnicy modułów sprężystości czujnika E_c i ściany E_s , w której jest zamocowany, wówczas gdy $E_c > E_s$. Przy zbliżonych wartościach tych modułów błąd wskazań dąży do zera. W przypadku gdy $E_s \gg E_c$ czujnik wskazuje mniejsze wartości i istnieje poza tym możliwość tworzenia się lokalnych sklepień. Ponieważ dla rzeczywistych ośrodków sypkich moduł E_g zależy od wartości naprężeń (nieliniowa charakterystyka materiału) zaleca się budowanie czujników, dla których spełniona będzie nierówność $E_c > 10 \cdot E_g$. Błąd wskazań będzie się zmieniał wówczas nieznacznie i może być określony przy cechowaniu. W przypadku natomiast dużych zmian modułu E_g przy zmianie naprężenia należy je uwzględnić przy określaniu względnego



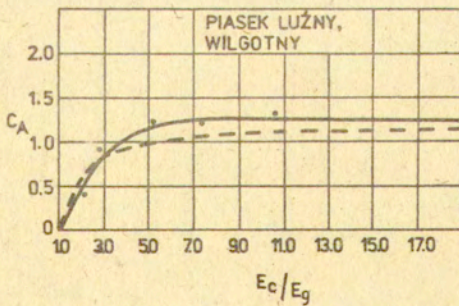
Rys. 7



Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10

błędu wskazań.

Moduł sprężystości czujnika zależy od ugięcia membrany pomiarowej, które powinno być jak najmniejsze żeby zapewnić dużą sztywność. Z drugiej natomiast strony pomiar ciśnienia działającego na czujnik związany jest z ugięciem membrany i przy większych ugięciach łatwiej jest je zmierzyć. Ponieważ te dwa sprzeczne wymagania są trudne do pogodzenia określa się doświadczalnie dopuszczalną, bezwymiarową wartość ugięcia czujnika odniesioną do jego średnicy. Uważa się, że czujnik jest tym lepszy im ma mniejsze bezwymiarowe ugięcie. Za dopuszczalne ugięcie czujnika odniesione do jego średnicy jedni autorzy [14] uważają wartość 10^{-4} , w innych pracach [19] podaje się wartość $3 \cdot 10^{-3}$, a można spotkać opisy czujników, których ugięcia są 10^{-6} [14].

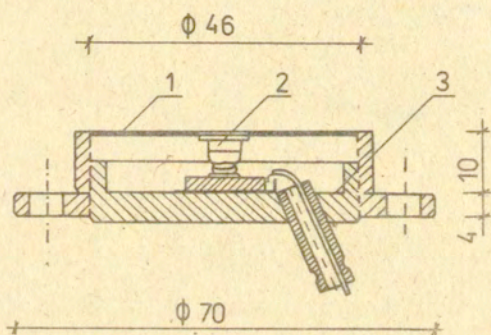
2.1. Czujniki pneumatyczne

Zasada pracy czujników pneumatycznych jest bardzo prosta. Czujnik ten w kształcie płaskiej puszkii ma elastyczną membranę, na którą z jednej strony działa parcie wywierane przez osrodek sypki, a z drugiej strony do wnętrza puszkii doprowadzane jest sprężone powietrze pod takim ciśnieniem, żeby zrównoważyć te parcie. Czujnik pneumatyczny stosowany w 1916 roku do badania naprężeń w gruncie przedstawiono na rys.11 [20]. Ugięcie wiotkiej membrany (1) powoduje zwarcie styków (2) i włączenie lampki sygnalizującej, że ciśnienie powietrza wewnątrz obudowy (3) czujnika nie równoważy ciśnienia wywieranego przez grunt z drugiej strony membrany. Zwiększając stopniowo ciśnienie powietrza odczytujemy jego wartość w momencie gdy lampka kontrolna zgaśnie, co sygnalizuje przesunięcie membrany i zrównoważenie ciśnienia gruntu. Czujnik, którego konstrukcję przedstawiono na rys.11 stosowany był w laboratoryjnych badaniach naprężeń w gruntach w zakresie do 0,35 MPa. Wprawdzie odczyt wartości ciśnienia następuje w momencie gdy membrana nie jest wgięta, ale pomiar związany jest z ugięciem membrany. Najpierw pod wpływem nacisku gruntu membrana ugina się do środka, a następnie pod wpływem zwiększania ciśnienia musi się wyprostować i przesunąć napierający grunt. Z zasadą pracy czujników pneumatycznych związana jest potencjalna możliwość wprowadzenia dużych błędów. Wynika to z faktu, że powrotny ruch

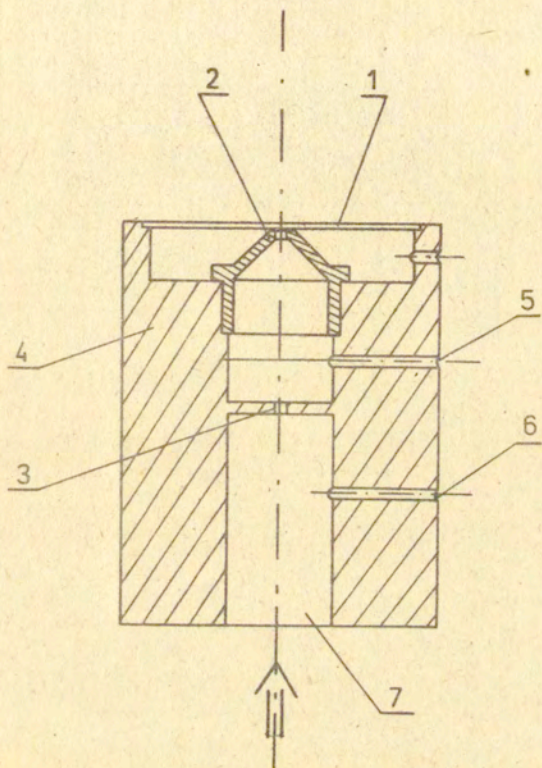
membrany wymaga pokonania biernego parcia gruntu, które jest znacznie większe od parcia czynnego. Powstały w ten sposób błąd jest zależny od wartości przesunięć membrany, a w rozwiązaniu przedstawionym na rys.11 przesunięcie te, rzędu dziesiątych części milimetra, jest zbyt duże. Istotną wadą opisanego czujnika jest ograniczenie jego zastosowania do badań statycznych zmian ciśnienia w gruncie. W przypadku konieczności pomiaru dynamicznych wartości ciśnień, jak to ma miejsce w silosach, czujnik o konstrukcji i zasadzie działania przedstawionej na rys.11 nie może być zastosowany nawet w badaniach laboratoryjnych.

Udoskonaloną wersję czujnika pneumatycznego zbudowano w 1961 roku i zastosowano do pomiarów naprężeń w gruncie [21]. Schemat działania tego czujnika przedstawiono na rys.12. Powietrze o stałym ciśnieniu przepływa przez przewód o dużym przekroju (7), w którym są dwa małe otwory. Pierwszy (3) o stałym przekroju i drugi o zmiennym przekroju (2), regulowanym odległością membrany (1) od płaszczyzny dyszy. Komora pod membraną jest połączona z atmosferą. Stosunek ciśnień mierzonych przy wylotach 5 i 6 jest, w pewnym zakresie, liniową funkcją stosunku przekrojów przepływu otworów 2 i 3. Membrana o średnicy 50 mm miała grubość 1 mm, a jej ugięcia były zawarte w przedziale od 0 do 0,005 mm. Stosunek średnicy do największego ugięcia wynosi 10000. Czujnikiem tym mierzono naprężenia w gruncie w zakresie do 7 kPa z dokładnością do 80 Pa. Czujnik w tej wersji ma niewielkie ugięcia membrany i umożliwia bezpośredni odczyt parcia gruntu przez pomiar ciśnienia w przewodzie (5) dla ustalonej wartości ciśnienia w przewodzie (6). Jest to istotne udoskonalenie poprzedniej konstrukcji, w której trzeba było sterować ciśnieniem powietrza doprowadzanego do czujnika.

Konstrukcję czujnika pneumatycznego o podobnej zasadzie jak w pracy [21] opracowano w wersji dostosowanej do mierzenia parcia osrodków sypkich i opisano w pracy [22]. Czujnik (rys.13) zbudowano w postaci puszkii o średnicy 80 mm i grubości 14 mm z membraną o grubości 0,6 mm z brązu berylowego. Do komory czujnika doprowadzane jest powietrze o stałym wydatku. Membrana pod wpływem obciążenia zewnętrznego przylega do dyszy zamykając jej wylot. Ciśnienie powietrza rośnie aż do momentu zrównoważenia obciążenia zewnętrznego. Membrana podnosi się otwierając otwór dyszy, przez



Rys. 11



Rys. 12

który zaczyna wypływać powietrze. Zmierzone wówczas ciśnienie powietrza określa obciążenie zewnętrzne działające na membranę z drugiej strony. Czujnik ten działa na tej samej zasadzie kaskady pneumatycznej co rozwiązanie z pracy [21]. Stosując oznaczenia jak na rys.14 można przedstawić charakterystykę statyczną kaskady wyrażając natężenia przepływu Q_1 i Q_2 przez dysze 1 i 2 jako funkcje ciśnienia powietrza doprowadzonego p_1 , w komorze między dyszami p_k i poza dyszą 2 (p_2) oraz wartości U_1 i U_2 natężenia przepływu powietrza zmierzonego przy różnicy ciśnień $\Delta p = p_1 - p_2 = 0,1$ MPa przy $p_2 = 0$. Otrzymamy wówczas:

$$Q_1 = U_1 \cdot [A_1 + B_1 \cdot \sqrt{p_1 - p_k}] \cdot \sqrt{(C_1 + p_1)^2 - (C_1 + p_k)^2}$$

$$Q_2 = U_2 \cdot [A_2 + B_2 \cdot \sqrt{p_k - p_2}] \cdot \sqrt{(C_2 + p_k)^2 - (C_2 + p_2)^2}$$

gdzie A_1 , B_1 , C_1 i A_2 , B_2 , C_2 oznaczają stałe współczynniki. Ponieważ w zastosowanym rozwiązaniu Q_1 utrzymywane jest na stałym poziomie niezależnym od wartości ciśnienia p_k , to charakterystykę kaskady określono ze wzoru na Q_2 przyjmując zmierzone doświadczalnie wartości współczynników A_2 , B_2 i C_2 . Wzór na Q_2 można wyrazić w postaci:

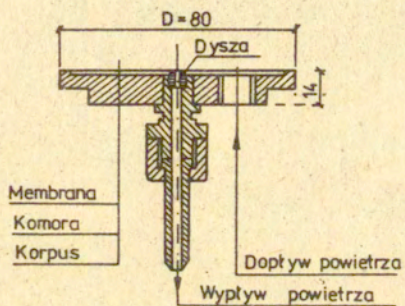
$$Q_2 = 1,08 \cdot U_2 \left[\frac{x}{x_h} - 0,08 \cdot \left(\frac{x}{x_h} \right)^2 \right] \cdot [0,631 - 0,01 \cdot \sqrt{p_k - p_2}] \cdot \sqrt{[1,23 + p_k]^2 - [1,23 + p_2]^2}$$

gdzie oznaczono: x - odległość membrany od dyszy w cm, $x_h = 0,05 \cdot d$, d - średnica dyszy w cm.

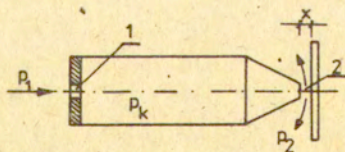
Dla rozwiązania przedstawionego na rys.13 mamy $d = 0,1$ cm, $p_2 = 0$ $U_2 = 280$ dm³/h i po odrzuceniu małych wyższego rzędu we wzorze na Q_2 otrzymamy:

$$Q_2 = 1,08 \cdot U_2 \cdot \frac{x}{x_h} \cdot [0,631 - 0,01 \cdot \sqrt{p_k}] \cdot \sqrt{[1,23 + p_k]^2 - 1,23^2}$$

skąd dostaniemy:



Rys. 13

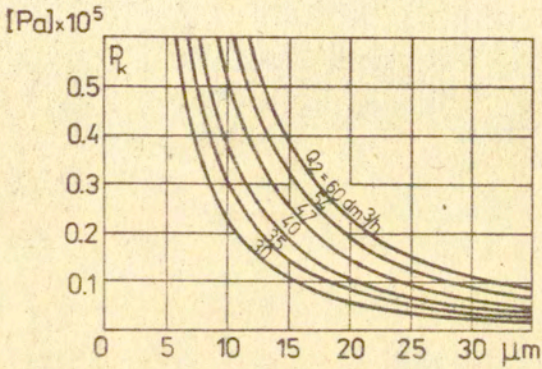


Rys. 14

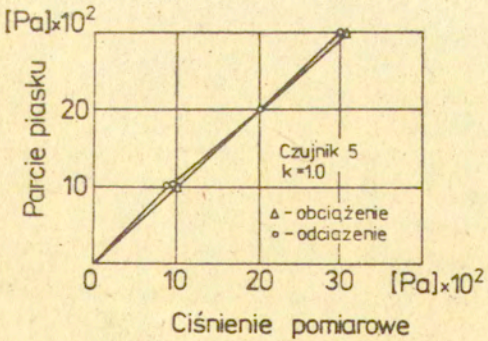
$$x = \frac{1,65 \cdot 10^{-6} \cdot Q_2}{(0,631 - 0,01 \cdot \sqrt{p_k}) \cdot \sqrt{(1,23 + p_k)^2 - 1,23^2}}$$

Zależność powyższą przedstawiono na rys.15 dla różnych wydatków przepływu Q_2 , z którego można wybrać wartości Q_2 i p_k takie, że ugięcie membrany będzie miało żadaną wartość. Jeśli przyjąc $Q_2 = 60 \text{ dm}^3/\text{h}$ to przyrostowi ciśnienia p_k od wartości 15 do 25 kPa będzie odpowiadało przemieszczenie membrany o $6 \text{ }\mu\text{m}$. Jeśli natomiast zwiększy się ciśnienie p_k od wartości 25 do 35 kPa to ugięcie membrany będzie $3,2 \text{ }\mu\text{m}$. Dobierając zatem grubość membrany przy danej jej średnicy $D=80 \text{ mm}$, odpowiednio do spodziewanego zakresu pomiaru obciążeń zewnętrznych możemy zapewnić wymaganą wartość stosunku średnicy do ugięcia membrany. W wersji wykonanej i testowanej w pracy [22] stosunek ten wynosił $80 \cdot 1000/6=13000$. Poprawność działania tego czujnika sprawdzono przy cechowaniu hydraulicznym oraz obciążeniem wywieranym przez piasek. Czujnik był osadzony w centralnym punkcie dna skrzyni o bokach $1,4 \cdot 1,4 \text{ m}$. Skrzynia była zasypywana warstwami piasku rzecznoego. Obciążenie czujnika zapisywano przy zdejmowaniu kolejnych warstw piasku. Charakterystykę otrzymaną w ten sposób dla jednego z czujników pokazano na rys.16. Stała k czujnika wyrażająca stosunek przyrostu ciśnienia p_k w komorze do przyrostu parcia piasku określanego jako iloczyn ciężaru właściwego γ i wysokości jego warstwy h jest równa w tym przypadku jedności. Czujnik charakteryzuje się dużą czułością i dokładnością pomiaru, jego histereza jest niewielka. Przy długotrwałych pomiarach należy jednak stosować w obiegu czyste powietrze instalując odpowiednie filtry, tak żeby uniknąć przesuwania się zera charakterystyki czujnika.

Czujniki pneumatyczne mogą być stosowane wyłącznie w badaniach laboratoryjnych i w zakresie quasi statycznych zmian obciążeń. Jest to istotna wada praktycznie eliminująca tego typu metodę pomiarową w zastosowaniu do badań rozkładu parć osrodków sypkich w silosach. W zagadnieniach tych efekty dynamiczne odgrywają pierwszorzędą rolę i nie mogą być pominięte. Czujnik, którego konstrukcję opisano [22] był projektowany z przeznaczeniem do badań parć osrodków sypkich na konstrukcje silosów, ale wyniki dalszych prac z wykorzystaniem tego czujnika nie zostały



Rys. 15



Rys. 16

opublikowane i trudno ocenić czy mimo tych zasadniczych wad rozwiązanie to było przydatne w badaniach.

2.2. Czujniki hydrauliczne

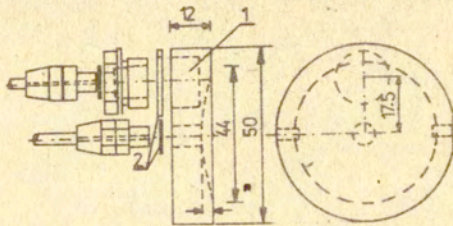
Czujnik hydrauliczny w najprostszej wersji zbudowany jest w postaci puszkii z uginającą się membraną. Wewnątrz puszkii znajduje się nieściśliwa ciecz. W przypadku konstrukcji tego typu czujnika [23] zastosowanego do badania parcia gruntu, w puszcze o średnicy 50 mm i grubości 12,5 mm znajdowała się woda. Rozwiązanie to pokazano na rys.17. Komora pod membraną połączona jest przewodem z rurką włosową o średnicy 0,25 mm, która służy do odczytywania ciśnienia wywołanego ugięciem membrany. Druga komora (1), która nie jest narażona na zmiany ciśnienia wywołanego ugięciem membrany wykorzystywana jest do określenia zmiany objętości cieczy pod wpływem zmian temperatury. W ten sposób można w odczytach zmian ciśnienia w komorze pomiarowej uwzględnić i wyeliminować zmiany wywołane różnicami temperatury. Czujnik ten, w wersji pokazanej na rys.17, wykorzystywano do pomiaru naprężeń działających na membranę w zakresie od 0 do 5 kPa (z dokładnością 70 Pa). Skalowanie przyrządu przeprowadzono pod działaniem wody i piasku. Stwierdzony duży rozrzut wyników cechowania pod działaniem piasku przypisywano dużej podatności membrany. Jedna działka na wyskalowanej rurce pomiarowej odpowiadająca przyrostowi ciśnienia o 70 Pa odpowiadała ugięciu membrany równemu $1/2000$ jej średnicy co stanowi 0,022 mm. Tak więc przy ciśnieniu 5 kPa ugięcie membrany jest równe 1,57 mm. Jest to wartość zbyt duża, która zgodnie z podanymi poprzednio rozważaniami będzie powodować istotne błędy pomiaru naprężeń działających na membranę.

W rozwiązaniu konstrukcji czujnika hydraulicznego zastosowanego do pomiarów nacisków pod płytami lotniska [24] uniknięto konieczności stosowania dużych ugięć membrany. Czujnik działa na zasadzie zaworu bezpieczeństwa [25]. Jest on zbudowany (rys.18) w postaci płaskiej, okrągłej puszkii o średnicy 170 mm. Membrana (3) o grubości 2 mm jest oparta na pierścieniowych żebrach (4) i pod wpływem ciśnienia gruntu zamyka centralny otwór (5) odprowadzający olej. W tym położeniu membrana przylega do czoła korpusu (2) i

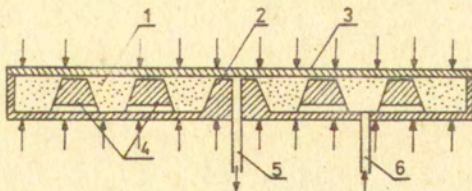
powierzchni żeber (4). Olej jest tłoczony ze stałym wydatkiem przez przewód (6). Z chwilą gdy ciśnienie oleju osiągnie wartość równą ciśnieniu zewnętrznemu działającemu na membranę unosi się ona nieznacznie do góry otwierając otwór odprowadzający (5). Zmierzone w tym momencie ciśnienie oleju jest równe ciśnieniu gruntu działającemu na membranę. W konstrukcji opisaney w pracy [24], przy stosunkowo małym wydatku pompowanego oleju równym $1 \text{ cm}^3/\text{min}$, podniesienie membrany o $5 \text{ }\mu\text{m}$ umożliwi przepływ oleju i pomiar nacisku gruntu. Stosunek średnicy czujnika do ugięcia membrany był więc dostatecznie duży i wynosił 34000. Czujnik służył do pomiarów naprężeń w zakresie od 0 do 1,5 MPa z dokładnością 1 kPa. Jego działanie sprawdzono w warunkach laboratoryjnych i w warunkach polowych przy długotrwałej pracy. Zasadniczy wpływ na dokładność pomiarów ma w tym wypadku dokładność wykonania powierzchni membrany i czujnika w miejscach wzajemnego styku. Istotną rolę odgrywa również manometr do mierzenia wartości ciśnienia oleju. Opisana konstrukcja jest przykładem rozwiązania dostosowanego do konkretnego celu. Jej zastosowanie do pomiarów parcia ośrodków ziarnistych na ściany silosu nie jest celowe ze względu na ograniczenie do pomiarów quasi statycznych zmian ciśnienia.

Rozwiązanie czujnika hydraulicznego dostosowanego do pomiaru parcia ośrodka sypkiego na ścianę silosu przedstawiono w pracy [26]. Konstrukcję tego prostego urządzenia pokazano na rys.19. Na wewnętrznej ścianie silosu przymocowany jest elastyczny zbiornik o wysokości 41 cm, szerokości 40 cm i grubości 2,5 cm. Zbiornik wypełniony nieściśliwą cieczą połączony jest bezpośrednio z manometrem (2). Nacisk ośrodka sypkiego powoduje¹⁶ wzrost ciśnienia cieczy w zbiorniku (3). Wadą tego rozwiązania jest jego sposób umieszczenia w silosie i wywołane zakłócenie przepływu materiału wzdłuż ściany. Zakłócenie to wymuszając lokalną zmianę kinematyki przepływu będzie powodować zwiększenie wartości ciśnienia wskazywanego przez czujnik.

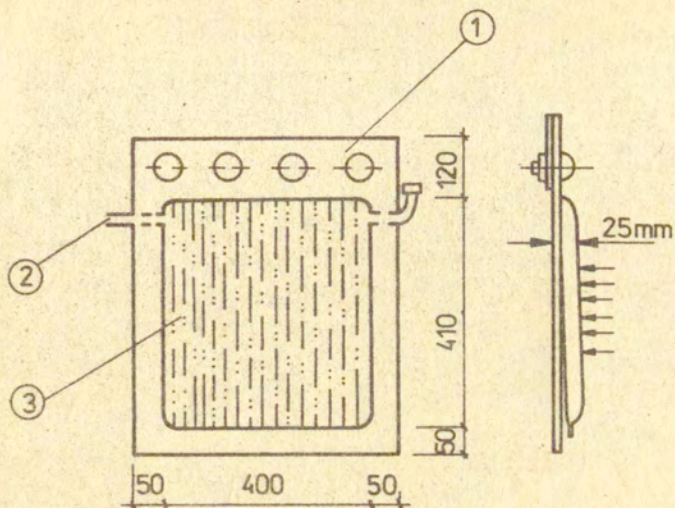
W innych stosowanych rozwiązaniach czujników hydraulicznych wykorzystywano możliwość łatwej realizacji przekładni ułatwiającej pomiar. Nie stosowano natomiast hydraulicznych urządzeń pomiarowych. Zmiany ciśnienia mierzono metodami elektrycznymi. W konstrukcji [16] przedstawionej na rys.20 sztywna membrana (1) o



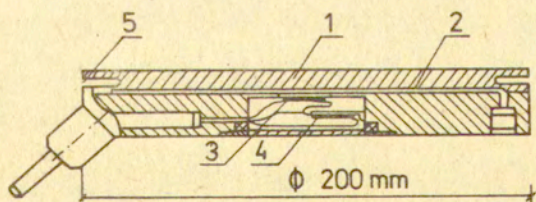
Rys. 17



Rys. 16



Rys. 19



Rys. 20

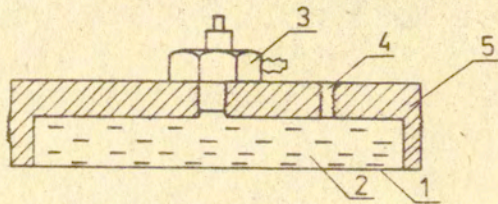
srednicy 200 mm przenosi naciski za pośrednictwem cieczy wypełniającej szczelinę (2) na membranę pomiarową (3), na której naklejone są, z drugiej strony, tensometry elektrooporowe, służące do pomiaru odkształceń. Dodatkowy tensometr (4) naklejony na nieodkształcanej części korpusu czujnika służy do kompensacji zmian temperatury w trakcie pomiaru. Sztywna membrana (1) tworzy jedną całość z korpusem czujnika, a jej ugięcia pod wpływem parcia osrodka sypkiego możliwe są dzięki obwodowemu podtoczeniu (5) na zewnętrznej części korpusu. Ugięcia membrany (1) wywołują ugięcia membrany pomiarowej (3) zwiększone w stosunku czynnej powierzchni membrany (1) i (3). Zwiększa się w ten sposób dokładność pomiaru przy zmniejszeniu ugięcia membrany głównej (1), które charakteryzuje odkształcalność całego czujnika. Efekt ten uzyskuje się pod warunkiem wypełnienia przestrzeni między membranami cieczą nieściśliwą. W wersji opisanej w pracy [16] warunek ten spełniono zalewając czujnik olejem w komorze próżniowej. Dodatkową trudnością jest wpływ temperatury na wskazania czujnika. Wprawdzie zastosowany układ półmostkowy z tensometrem kompensacyjnym eliminuje wpływ temperatury na pomiar odkształceń membrany (3), ale zmiana temperatury czujnika będzie powodować zmiany objętościowe cieczy w szczelinie (2) powodując błędy pomiarowe. Czujnik w wersji przedstawionej na rys.20 może być stosowany tylko w warunkach ustalonej temperatury. Może być stosowany do pomiarów statycznych i dynamicznych zmian ciśnienia.

Konstrukcję czujnika zbudowanego na zasadzie przekładni hydraulicznej opracowano na początku lat siedemdziesiątych i stosowano do pomiarów parcia różnych osrodków na ścianę silosu zarówno w badaniach rzeczywistych obiektów jak i na modelach [27,28,29,30]. Schemat konstrukcji tego czujnika przedstawiono na rys.21 na podstawie pracy [14]. W mosiężnej obudowie (5) o srednicy 18 cm znajduje się nieściśliwa lub mało ściśliwa ciecz (2), jak to określono w pracach [30] i [29]. Powierzchnię czujnika tworzy wiotka membrana (1) wykonana z blachy miedzianej o grubości 0,1 mm. W centralnej części korpusu czujnika umieszczony jest indukcyjny przetwornik ciśnienia typu OT-22 o zakresie pomiarowym 50 lub 100 kPa. Uwzględniając, że wewnątrz handlowego przetwornika ciśnienia jest membrana, której ugięcia przekazywane są na trzpień indukcyjnego czujnika przemieszczeń mamy typową przekładnię

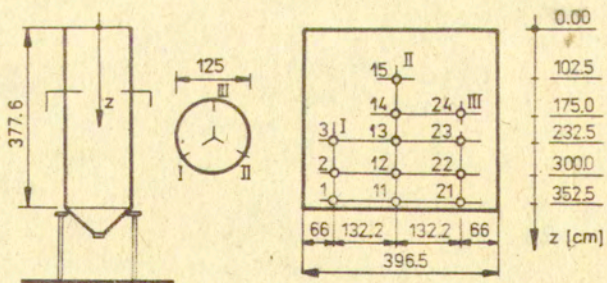
hydrauliczną. W przeciwieństwie jednak do konstrukcji pokazanej na rys.20, w tym przypadku ugięcia membrany nie były określane w trakcie cechowania czujnika i mogą być znaczne ze względu na dużą objętość cieczy i możliwość pozostawienia baniek powietrznych w trakcie zalewania czujnika przez otwór (4) w korpusie. Czynność ta, jak to podkreślono w pracy [14] nie była wykonywana w komorze próżniowej. Zbyt duże ugięcia wiotkiej membrany czujnika mogą być jedną z przyczyn błędów pomiarowych. Drugą przyczyną, która może powodować istotne błędy jest brak możliwości wyeliminowania wpływu zmian temperatury w trakcie pomiarów. Zmiany takie mogą powstawać w trakcie przemieszczania się materiału i jego tarcia o cienką membranę, z której ciepło przekazywane jest na ciecz wypełniająca czujnik. Może to zakłócić pomiary szczególnie w trakcie opróżniania silosu. Trzecią wreszcie przyczyną możliwych błędów jest usytuowanie czujników w ścianie silosu. Powierzchnia membrany odsunięta była o około 20 mm od lica ściany [30]. Wykonanie sfazowania czujników przez nałożenie przy ich krawędzi zaprawy gipsowej z pochyleniem 1:5 nie może usunąć zakłócenia przepływu osrodka sypkiego wywołanego wystającym czujnikiem. Czujniki tego typu zastosowano w badaniach rozkładu parć na ścianki modelu silosu o średnicy wewnętrznej 1,25 m, wysokości 3,78 m i grubości ścianki 2,5 cm [29]. Model wykonany z żelbetu połączony był z żelbetowym, centralnym lejem wysypowym. Silos zasypywano przenicą o ciężarze objętościowym $\gamma=800 \text{ kg/m}^3$ i kącie tarcia wewnętrznego $\varphi=32^\circ$. W walcowej części silosu umieszczono 15 czujników o konstrukcji jak na rys.21. Czujniki wkręcane były w stalowe obudowy osadzone w ścianach silosu. Czujniki rozmieszczono na pięciu poziomach wysokości silosu wzdłuż trzech tworzących rozstawionych co 120° . Wymiary modelu i rozmieszczenie czujników pokazano na rys.22. Wskazania poszczególnych czujników rejestrowano w sposób ciągły w fazie napełniania i opróżniania silosu. Przykład takich wykresów pokazano na rys.23 dla dwóch czujników umieszczonych na sąsiednich poziomach w środkowej części wysokości silosu. Wprowadzono tam następujące oznaczenia:

p_* - wartość parcia zmierzonego przez czujnik na danym poziomie po całkowitym napełnieniu silosu,

p_d - największa wartość parcia dla danego czujnika w fazie opróżniania silosu,



Rys. 21



Rys. 22

Δp - przeciążenie, przyrost parcia dynamicznego (w fazie opróżniania) w stosunku do parcia statycznego,

T - czas liczony od otwarcia otworu spustowego,

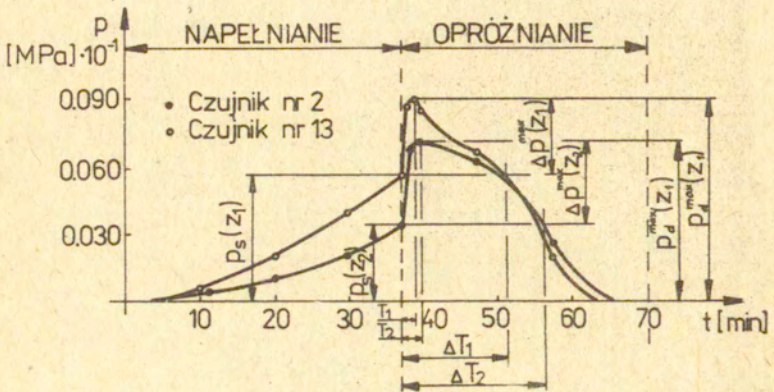
T_1 - czas od otwarcia otworu spustowego do wystąpienia maksymalnej wartości parcia rejestrowanego przez dany czujnik,

ΔT - okres czasu, w którym parcie dynamiczne jest większe od wartości parcia statycznego.

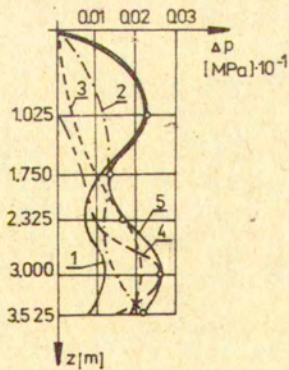
Mając zarejestrowane wykresy obciążeń poszczególnych czujników jako funkcje czasu można zbudować wykresy rozkładu poziomych obciążeń ściany silosu. Wykres obciążeń statycznych nie zależy od czasu natomiast po otwarciu spustu rozkład obciążeń zależy od czasu. Wykres rozkładu przeciążeń Δp wzdłuż wysokości silosu dla różnych czasów T od otwarcia spustu przedstawiono na rys.24. Łącząc ze sobą odcinki wykresów o największych wartościach przeciążeń dla różnych czasów autorzy otrzymali rozkład (5) największych przeciążeń Δp^{max} wzdłuż długości silosu dla całego cyklu opróżniania.

Obciążenia poziome ściany silosu można scharakteryzować przez cztery wykresy przedstawione na rys.25. Na wykresie a) przedstawiono rozkład parcia statycznego zmierzonego po całkowitym napełnieniu silosu. Największe przeciążenie Δp^{max} w całej fazie opróżniania przedstawiono na rys.25 b. Rozkład największych wartości parcia dynamicznego określonego jako suma parcia statycznego na danej wysokości "z" silosu i największego przeciążenia rejestrowanego na tej wysokości w trakcie całej fazy opróżniania, przedstawiono na rys.25 c. Na wykresie d) przedstawiono rozkład współczynnika dynamicznego zdefiniowanego jako stosunek $\varphi^{max}(z) = p_d^{max}(z) / p_s(z)$. Ważnym uzupełnieniem charakterystyki parć dynamicznych jest czas trwania przeciążeń Δp dla danej wysokości silosu i czas T_z , w którym występuje największa wartość obciążenia w całym procesie opróżniania dla danej wysokości. Wykresy takie przedstawiono na rys.26. Krzywa (1) na wykresie a) przedstawia całkowity czas działania obciążenia na czujnik na danej wysokości. Krzywa (2) przedstawia czas trwania przeciążeń w stosunku do obciążenia statycznego na danym poziomie. Czas T_z wystąpienia największych obciążeń poziomych przedstawiono na rys.26 b.

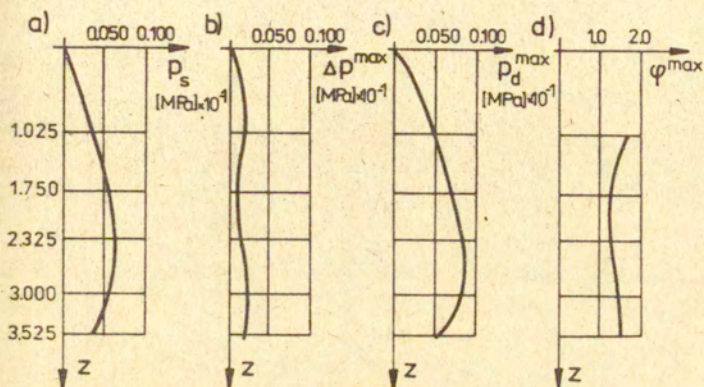
Interesujące jest porównanie wyników doświadczeń i teorii



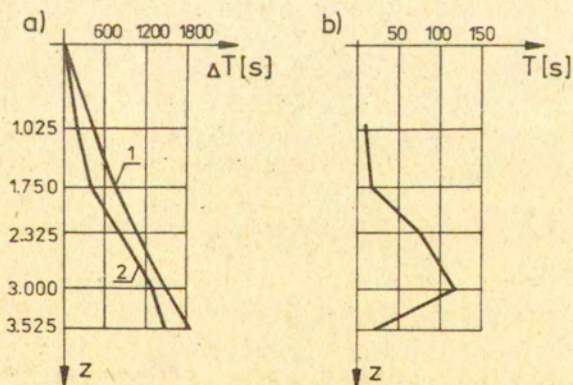
Rys. 23



Rys. 24



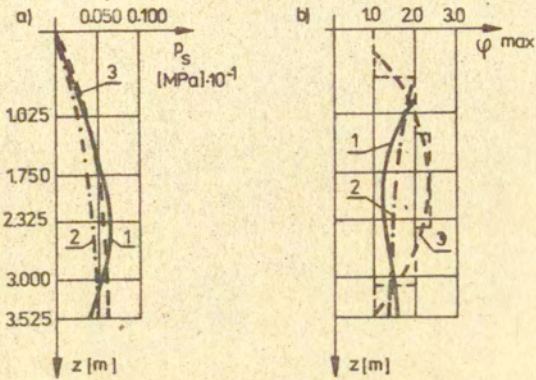
Rys. 25



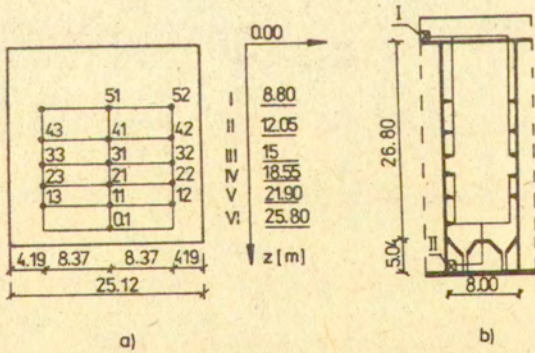
Rys. 26

zamieszczone w pracy [29] i przedstawione na rys.27. Rozkład parć statycznych pokazano na rys.27 a, a zmianę największych wartości współczynnika dynamicznego wzdłuż wysokości silosu na wykresie b). Liniami ciągłymi oznaczonymi cyfrą (1) przedstawiono wyniki pomiarów. Liniami przerywanymi pokazano wykresy obliczeniowe. Krzywa (2) na wykresie a) obliczona została według wzoru Janssena, krzywa (3) według braci Reimbert. Wartości współczynników dynamicznych obliczonych według DIN 1055 z 1964 roku przedstawiono linią (2) na wykresie b). Linia (3) przedstawia uśrednienie schodkowego wykresu przeciążeń zalecanego do obliczeń przez źródła radzieckie z 1953 roku (Promziernoprojekt). Pomijając zgodność i rozbieżność wyników pomiarów z zaleceniami obliczeniowymi należy zwrócić uwagę na charakterystyczne zmniejszenie parcia poziomego przy dnie silosu. Zmniejszenie to nie znajduje potwierdzenia teoretycznego i może być wynikiem błędów pomiarowych zastosowanych czujników.

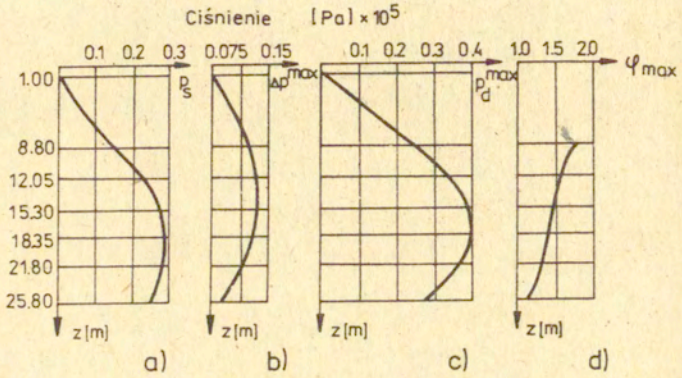
Parcie zboża na ścianki żelbetowych silosów o wysokości 26,8 m i średnicy 8 m było przedmiotem badań w pracy [30]. Zastosowano czujniki hydrauliczne o konstrukcji przedstawionej na rys.21. Stalowe obudowy, w które wkręcano korpus czujników były osadzone w ścianie silosu w miejscach pokazanych na rys.28 a, przedstawiającym rozwinięcie walcowej części komory. Dla uniknięcia zbyt długich kabli zainstalowano dwa stanowiska pomiarowo-rejestrujące, jedno na stropie baterii, a drugie pod lejami silosu (rys. 28 b). Wyniki pomiarów zmiany parcia w fazie napełniania i opróżniania silosu pszenicą o ciężarze objętościowym $\gamma=800 \text{ kg/m}^3$, kącie tarcia wewnętrznego $\phi=32^\circ$ i współczynnika tarcia o ścianę silosu $\mu=0,41$ przedstawiono w postaci rozkładu parcia statycznego p_s , największych przeciążeń Δp^{\max} , największych wartości parcia dynamicznego p_d^{\max} i największych wartości współczynnika dynamicznego ϕ_{\max} wzdłuż ściany silosu. Dane doświadczalne przedstawiono na kolejnych wykresach a), b), c), d) na rysunku 29. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń przedstawiono na rys.30. Rozkład parcia poziomego p_s zmierzony na rzeczywistym obiekcie (krzywa 1) porównano z wynikami obliczeń według normy radzieckiej SN 302/65 (krzywa 2), niemieckiej DIN 1055 (krzywa 3) i według Janssena (krzywa 4 - rys.30 a). Doświadczalny rozkład współczynnika dynamicznego przedstawiono



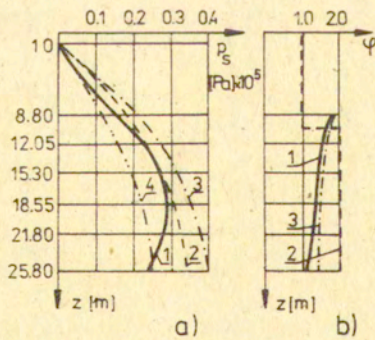
Rys. 27



Rys. 28



Rys. 29

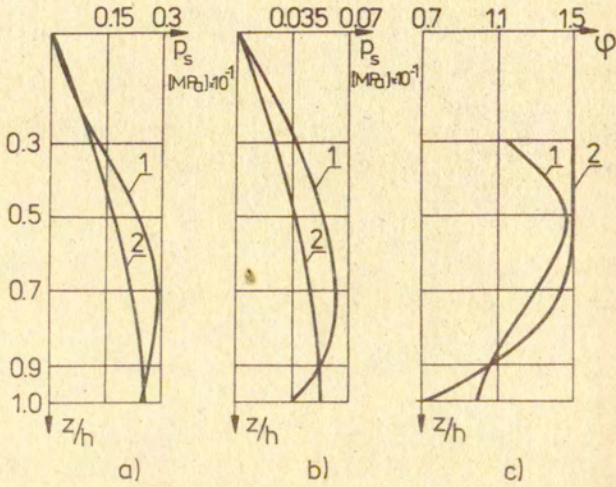


Rys. 30

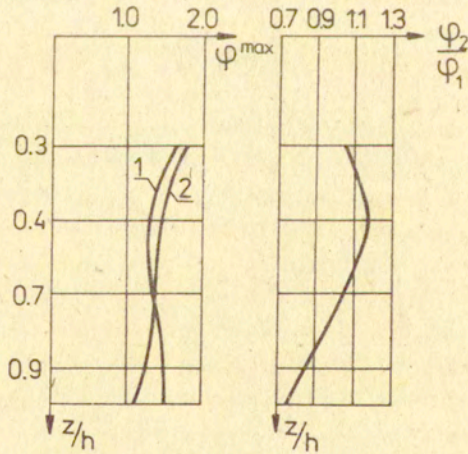
linią ciągłą (krzywa 1) na wykresie b). Linia (2) określa wartości tego współczynnika zalecane do obliczeń według normy radzieckiej (SN 302/65), a krzywa (3) według normy niemieckiej (DIN 1055).

Interesujące jest również porównanie wyników otrzymanych z badań obiektu w skali naturalnej i na modelu zamieszczone w pracy [30]. Wyniki pomiarów przedstawiono jako funkcje bezwymiarowej wysokości napełnienia komory odniesionej do całej wysokości silosu. Przetworzone w ten sposób wykresy parć statycznych przedstawiono na rys.31 dla pomiarów w skali naturalnej (wykres a) i na modelu silosu (wykres b). W obu przypadkach krzywe (1) oznaczają wykresy doświadczalne, a krzywe (2) wykresy obliczone według wzoru Janssena. Na rys.31 c przedstawiono zmiany stopnia korelacji określonego jako stosunek parcia zmierzonego do parcia obliczonego dla skali naturalnej (krzywa 1) oraz dla badań na modelu (krzywa 2). Bezwzględne wartości parcia poziomego określone w badaniach silosu w skali naturalnej są większe od wartości określonych dla modelu silosu (skala wymiarów liniowych 1:6), ale przebieg stopnia korelacji z wynikami obliczeń jest w obu przypadkach podobny. Porównanie współczynników dynamicznych (rys.32) dla badań w skali naturalnej (krzywa 2) i na modelu (krzywa 1) pokazuje ich zbliżony charakter. Stopień korelacji obu tych krzywych zdefiniowany jako stosunek $\varphi_2^{\max} / \varphi_1^{\max}$ zmienia się w przedziale 0,732 do 1,16. Z przedstawionego porównania autorzy pracy [30] wnioskuje o praktycznej przydatności badań przeprowadzanych na dużych modelach silosów. Ułatwia to przeprowadzenie badań, zmniejsza ich koszt i umożliwia przeprowadzenie doświadczalnej analizy różnych czynników na rozkład parcia, których rozdzielenie w przypadku rzeczywistych konstrukcji jest trudne lub wręcz niemożliwe do przeprowadzenia.

Badania wpływu rury odciążającej wewnątrz silosu oraz prędkości jego napełniania i opróżniania na rozkład parcia na jego ścianę przeprowadzono [31] przy pomocy czujników hydraulicznych o konstrukcji z rys.21. Badania przeprowadzono na żelbetowym modelu silosu o średnicy 1,25 m i wysokości części walcowej 3,77 m napełnianym pszenicą. Rozmieszczenie czujników jest takie samo jak pokazano na rys.22. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.33. Badania przeprowadzono dla silosu bez rury odciążającej (wykres a), z rurą o średnicy 200 mm o różnej perforacji otworów



Rys. 31



Rys. 32

wysypowych (wykresy b i c) oraz z rurą odciążającą o średnicy 300 mm. Rejestrowano wykresy parcia statycznego (krzywa 1 i 3) i dynamicznego (krzywa 2 i 4) przy napełnianiu i opróżnianiu silosu z prędkością 6850 kg/h (linia ciągła) i 2400 kg/h (linia przerywana). Pokazane na rysunku wykresy parcia dynamicznego przedstawiają jak poprzednio obwiednię największych wartości rejestrowanych dla danego poziomu w trakcie całego procesu opróżniania. Wykresy współczynników dynamicznych dla czterech wariantów konstrukcji silosu (bez rury odciążającej (a) i z rurą odciążającą (b, c, d)) oraz różnych prędkości przepływu materiału przedstawiono na rys.34. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów i porównanie z wynikami obliczeń przedstawiono na rys.35. Rozkłady parć statycznych przedstawiono na wykresie a) dla:

- 1 - pomiaru dla silosu bez rury odciążającej,
- 2 - pomiaru dla silosu z rurą o średnicy 200 mm,
- 3 - pomiaru dla silosu z rurą o średnicy 300 mm,
- 4 - obliczeń wg Janssena,
- 5 - obliczeń wg Reimbert'ów,
- 6 - obliczeń wg Frölich'a.

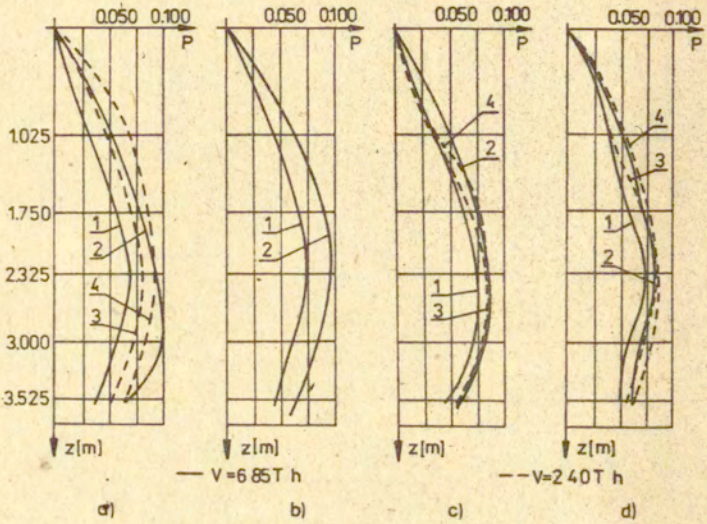
Wartości współczynników dynamicznych pokazano na wykresie b) dla:

- 1 - pomiarów dla silosu bez rury odciążającej,
- 2 - pomiarów dla silosu z rurą o średnicy 200 mm,
- 3 - pomiarów dla silosu z rurą o średnicy 300 mm,
- 4 - obliczonych wg DIN 1055 z 1964,
- 5 - obliczonych wg SN 302-65.

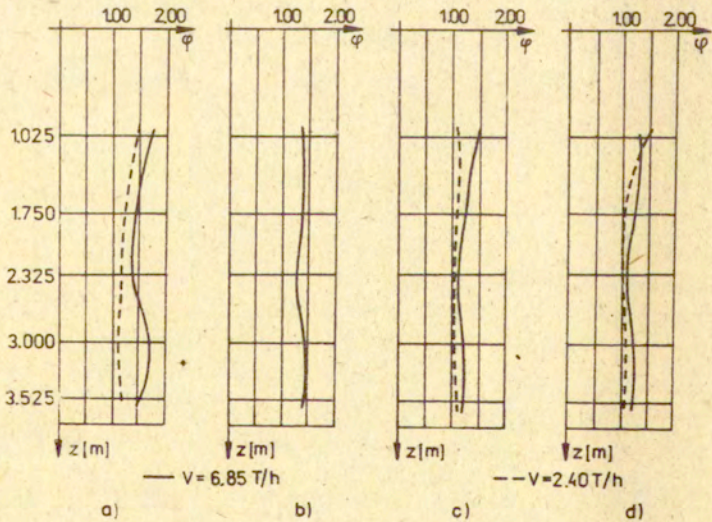
Wyniki pomiarów przedstawione na rys.35 otrzymano dla mniejszej wartości prędkości napełniania i opróżniania silosu.

Nie analizując głębiej wpływu badanych w pracy parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych silosu na rozkład poziomego parcia działającego na jego ścianę trzeba zwrócić uwagę na podobny charakter otrzymanych wykresów wykazujących malejące wartości w dolnej części silosu. Ta jakościowa różnica charakteru wykresu doświadczalnego w stosunku do przewidywań teoretycznych jest wyraźnie widoczna na rys.35. Jest to zastanawiające mimo, że jak stwierdza się w pracy [31] zmierzone wartości parcia statycznego leżą między wartościami obliczonymi na podstawie wzorów podanych przez Janssena (krzywa 4) i Frölich'a (krzywa 6). Trudno jednak ocenić na podstawie fragmentarycznie prezentowanych wyników czy

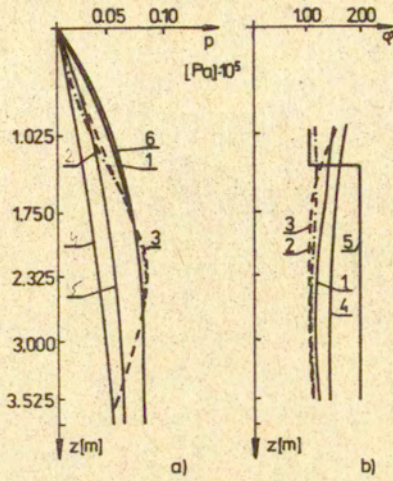
ciśnienie [Pa]·10⁵



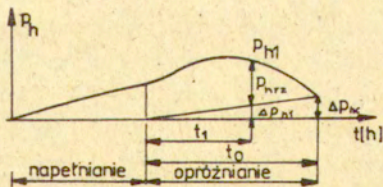
Rys. 33



Rys. 34



Rys. 35



Rys. 36

obserwowany charakter wykresów przedstawia rzeczywisty rozkład parcia na ścianę silosu czy też spowodowany jest błędami pomiarowymi. Omawiając w poglądowy sposób dokładność pomiaru naporu ośrodka sypkiego w silosach autorzy konstrukcji czujnika hydraulicznego przedstawionego na rys.21 podają prosty sposób uwzględnienia wpływu zmian temperatury na jego wskazania (rys.36) [32]. Rejestrując ciśnienie wskazywane przez czujnik w fazie napełniania i opróżniania otrzymujemy wykres $p_{h1}(t)$. Po całkowitym opróżnieniu silosu wartość wskazywana przez czujnik $p_{h1}(t_0)$, licząc od rozpoczęcia opróżniania, wynika z przyrostu temperatury wskutek tarcia przepływającego materiału o ścianki silosu i membrany. Zakładając, że zmiany temperatury mają miejsce tylko w fazie opróżniania silosu oraz, że błąd spowodowany tymi zmianami jest liniową funkcją czasu opróżniania możemy dla każdej chwili t_1 określić wartość rzeczywistą naporu poziomego p_{hrz} po odjęciu bezwzględnego błędu Δp_{h1} . Brak jest jednak danych czy wyniki wcześniej prezentowanych prac, w których wykorzystywano czujniki tego typu uwzględniały taką korektę wpływu temperatury.

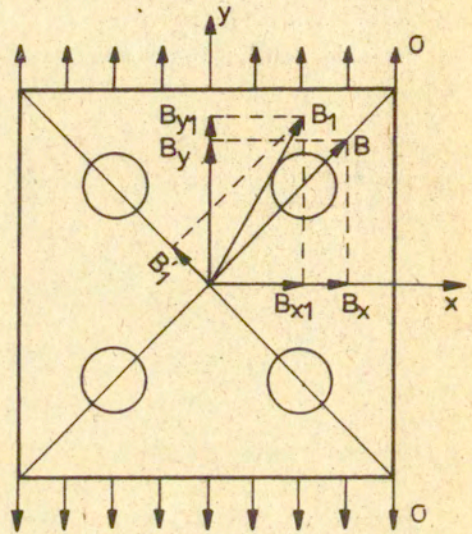
2.3. Czujniki elektryczne

Ogólne zasady konstrukcji czujników elektrycznych do pomiaru parć ośrodków sypkich na ściany silosu są takie same jak poprzednio omówionych rozwiązań. W czujnikach tych jest elastyczna lub ruchoma membrana, która odkształca się lub przemieszcza pod wpływem nacisków ośrodka sypkiego. Pomiar wywołanych zmian położenia membrany wykonuje się metodami elektrycznymi wykorzystując czujniki różnego typu jak oporowe, indukcyjne, pojemnościowe, strunowe czy magnetosprężyste. We wszystkich tych rozwiązaniach dąży się do zmniejszenia ugięć membrany i zwiększenia tym samym sztywności czujnika przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej dokładności pomiaru. Pogodzenie ze sobą tych dwóch, przeciwstawnych warunków jest zasadniczym celem przy konstruowaniu czujników do pomiaru parcia materiałów sypkich na ścianę silosu. Budując nowe wersje czujników należy również brać pod uwagę szereg innych czynników, które mogą mieć decydujące znaczenie na ostateczny rezultat. Decydując się na wybór określonego typu przetwornika zamieniającego zmiany mechaniczne na

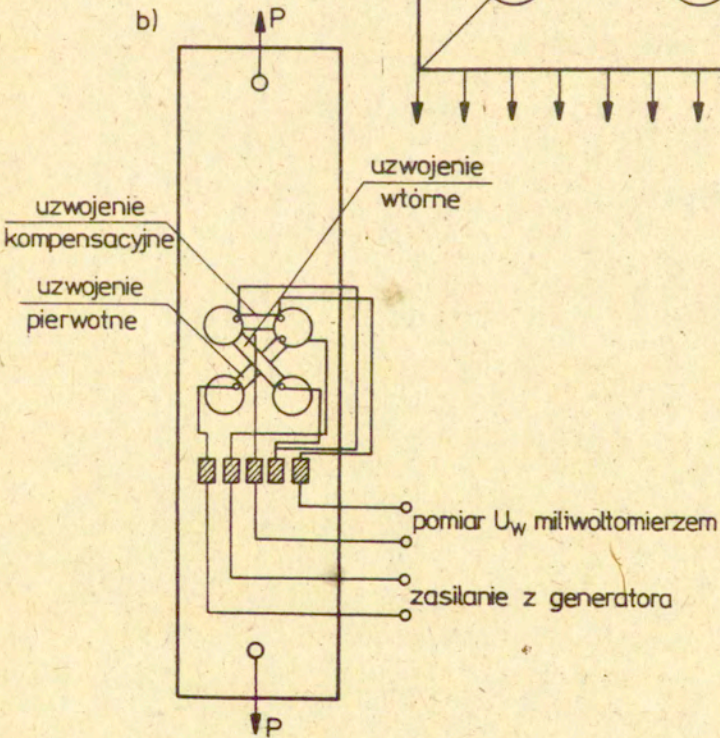
proporcjonalny sygnał elektryczny trzeba uwzględnić warunki przesyłania tych sygnałów i rodzaj aparatury elektronicznej niezbędnej do ich dalszej obróbki. Jest to najczęściej wybór nie metody pomiaru, a rodzaju potrzebnej aparatury. W przypadku zastosowania przetworników oporowych czy indukcyjnych możemy wykorzystać typowe wzmacniacze i mierniki. Aparatura tego typu jest obecnie powszechnie wykorzystywana w mechanice do pomiaru odkształceń i przemieszczeń. Zastosowanie czujników strunowych będzie wymagać kompletowania całego zestawu aparatury elektronicznej do pomiaru częstotliwości drgań własnych struny w zależności od jej naprężenia. Czujniki strunowe są wprawdzie produkowane wraz z odpowiednią aparaturą przez specjalistyczne firmy, ale jest to technika pomiarowa znacznie mniej rozpowszechniona w stosunku do dwóch poprzednio wymienionych. Podobna sprawa jest z czujnikami pojemnościowymi i magnetosprężystymi, które są produkowane na świecie przez nieliczne firmy. Ich stosowanie wymaga kompletowania specjalistycznych urządzeń pomiarowych, a w przypadku ograniczeń finansowych zachodzi konieczność budowania takich urządzeń we własnym zakresie.

Rozwiązanie takie przyjęto na Politechnice Wrocławskiej decydując się, w latach siedemdziesiątych, na budowę czujnika do pomiaru parć ośrodka sypkiego na ściany silosu, w którym zastosowano magnetosprężysty przetwornik. Jego zasadę działania przedstawiono na rys.37 [14]. Na rdzeniu ferromagnetycznym, wykonanym z blachy transformatorowej, jest uzwojenie pierwotne i wtórne. Zasilanie uzwojenia pierwotnego z generatora o dużej częstotliwości tworzy pole magnetyczne w rdzeniu i indukuje napięcie w uzwojeniu wtórnym. Przykładając zewnętrzne obciążenie do rdzenia ferromagnetycznego powodujemy zmianę jego wymiarów co wywołuje zmianę pola magnetycznego, a w konsekwencji i napięcia w uzwojeniu wtórnym. W ten sposób mierząc napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym możemy określić wartość przyłożonego do czujnika obciążenia. Zależność tych dwóch zmiennych jest nieliniowa i zależna od temperatury (rys.38), ale w konkretnych rozwiązaniach konstrukcyjnych staramy się tak dobrać parametry przetwornika, żeby jego charakterystyka w żądanym zakresie była zbliżona do liniowej. Przykład wzorcowania czujnika magnetosprężystego

a)

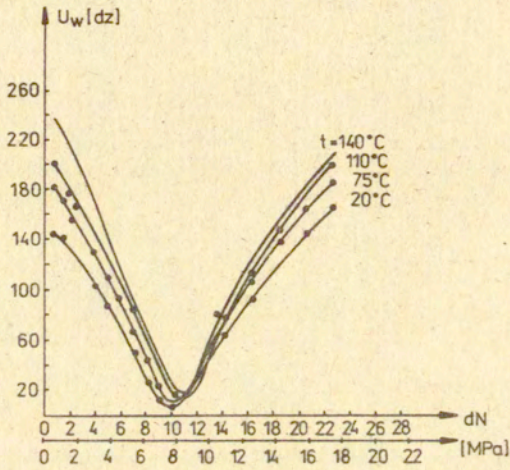


b)

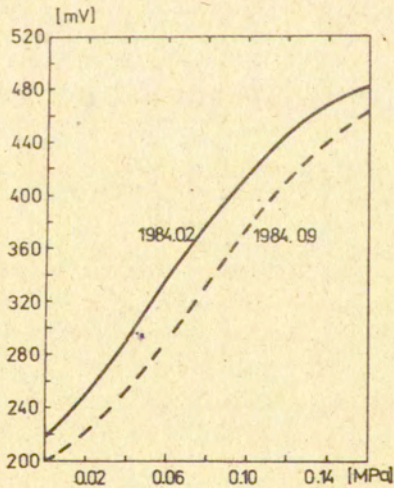


Rys. 37

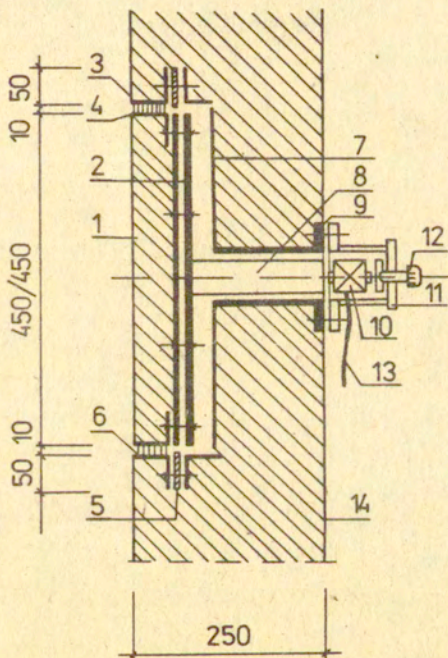
przeznaczonego do badania parcia na ściany silosu przedstawiono na rys.39 [33]. Cechowanie przeprowadzono przy wzroście obciążenia powtarzając pomiary po pewnym okresie czasu. Otrzymano, widoczne na rysunku, przesunięcie charakterystyki czujnika, które tłumaczy się wpływami mechanicznymi w zamocowaniu przetwornika magnetosprężystego we wnętrzu puszki pomiarowej. Jest to istotna wada przetwornika magnetosprężystego, która eliminowana była w konkretnych pomiarach poprzez dwukrotne wzorcowanie czujnika przed i po badaniach. Rozwiązanie konstrukcyjne czujnika parć osrodków sypkich na ściany silosu z przetwornikiem magnetosprężystym przedstawiono na rys.40. Czujnik tej konstrukcji stosowano w pomiarach przeprowadzanych na rzeczywistych obiektach [34]. Zasady konstrukcji i wyniki cechowania przedstawiono w 1970 roku [35]. Czujnik w wersji przedstawionej na rys.40 przeznaczony był do badań parć na ścianki silosu, w którym w trakcie jego budowy osadzono w określonych miejscach gniazda (7) wykonane z blachy stalowej. Membranę o średnicy 450 mm wykonano w postaci sztywnej płyty stalowej (2 i 4), na której wylano warstwę betonową (1). Zapewniono w ten sposób jednakowe warunki tarcia materiału sypkiego o betonowe ściany silosu i powierzchnię czujnika. Między zewnętrzną (3) i wewnętrzną (4) ramą stalową obudowy i membrany znajduje się uszczelka elastyczna (6) uniemożliwiająca przenikanie materiału pod membranę czujnika. Przepona (5) stanowiąca element obudowy osadzonej w ścianie silosu (14), jest dodatkowym zabezpieczeniem. Na zewnętrznej stronie ściany silosu przykręcona jest do stalowego kołnierza (9) obudowa (11) przetwornika magnetosprężystego (10). Śruba regulacyjna (12) służy do kasowania luzów między powierzchniami przetwornika i trzpienia stalowego (8) przekazującego naciski działające na membranę na element pomiarowy. Czujnik połączony jest elastycznymi przewodami (13) ze stanowiskiem pomiarowym, rejestrującym automatycznie, w określonych odstępach czasu wskazania kolejnych czujników umieszczonych w różnych miejscach na ścianie lub dnie silosu (33). Rejestracja pomiarów może być, w zależności od zestawu urządzeń elektronicznych, prowadzona w sposób ciągły dla każdego z czujników, [34]. Przedstawiony na rys.40 sposób zamocowania czujnika w ścianie silosu przeznaczony był do długotrwałej kontroli działających obciążeń w różnych fazach pracy. Brak



Rys. 38



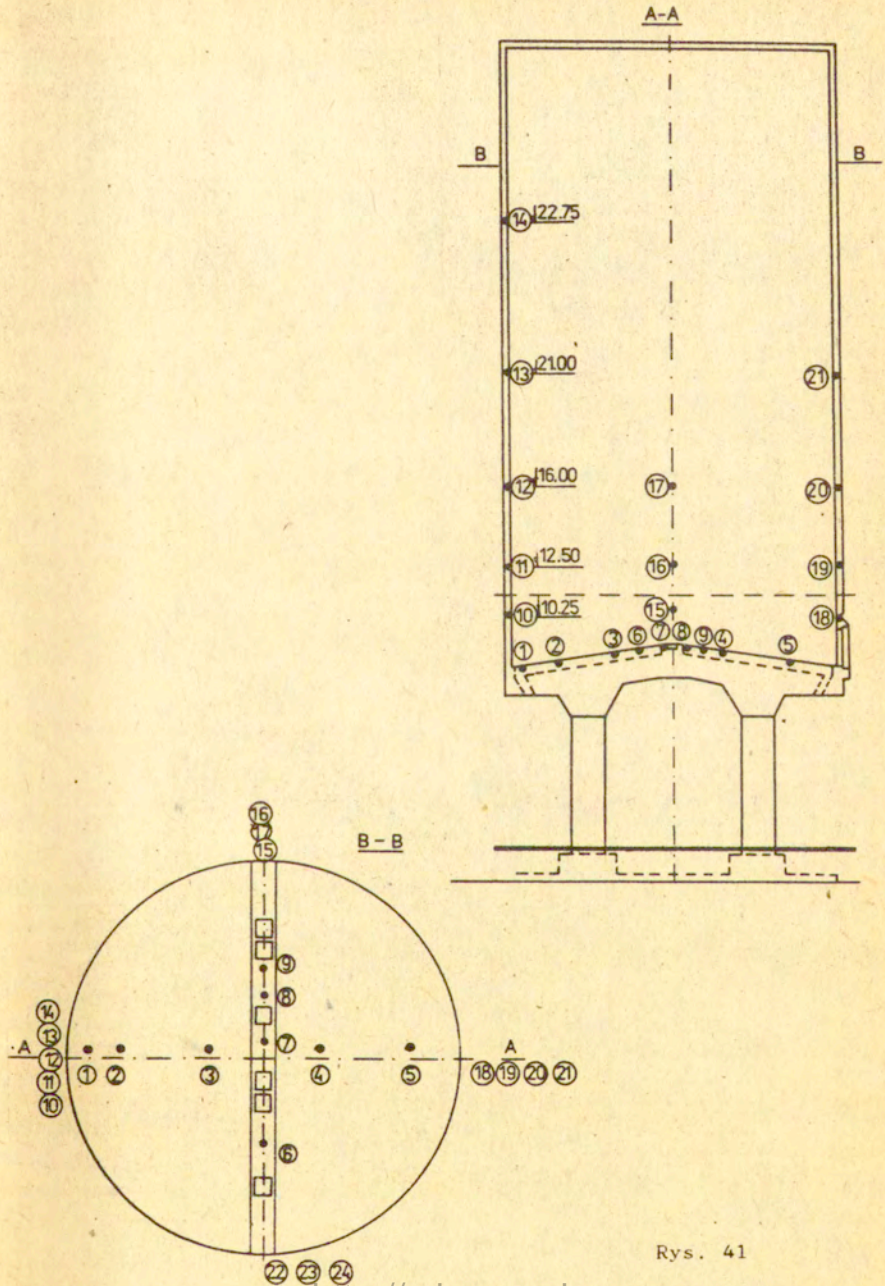
Rys. 39



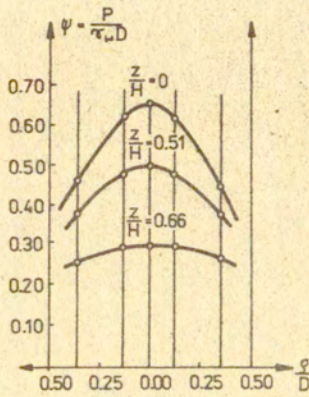
Rys. 40.

możliwości wyjęcia membrany czujnika od zewnętrznej ściany silosu stanowi jednak istotną wadę. Nie jest możliwe oczyszczenie gniazda i membrany z materiału przenikającego między te dwa elementy i po pewnym czasie czujnik przestaje poprawnie działać. Druga wada związana jest z możliwością niesymetrycznego obciążenia na powierzchni membrany, które wobec braku prowadzenia trzpienia może powodować jego przeginięcie i wzrost oporów tarcia. W wersji przedstawionej na rys.40 i wykorzystywanej w badaniach silosu cementowego [34,36] powierzchnia membrany wynosiła $0,2 \text{ m}^2$ i jej niesymetryczne obciążenie jest bardzo prawdopodobne. Zaletą natomiast związaną z zastosowanym przetwornikiem magnetosprężystym jest małe ugięcie membrany nie przekraczające $3 \mu\text{m}$ w całym zakresie pomiarowym. Tak więc stosunek średnicy membrany do jej ugięcia jest bardzo duży i wynosi 150000. Istotną cechą tego czujnika jest możliwość jego zastosowania w pomiarach statycznych i dynamicznych wartości parć osrodków sypkich w silosach. Czujnik był tak zainstalowany w gnieździe silosu żeby przetwornik pracował na wznoszącej się gałęzi charakterystyki pokazanej na rys.38. Wymaga to wprowadzenia wstępnego nacisku przetwornika, który może ulegać zmianie przy długotrwałych obciążeniach. Dodatkową komplikacją przy budowie magnetosprężystych przetworników jest fakt, że każdy egzemplarz ma inną charakterystykę i w razie konieczności stosowania czujników o podobnych współczynnikach trzeba dobierać je doświadczalnie z większej serii. Jest to niedogodność w przypadku stosowania jednego miernika i przełącznika kanałów, bowiem w skrajnych przypadkach musimy zmieniać zakres pomiarowy.

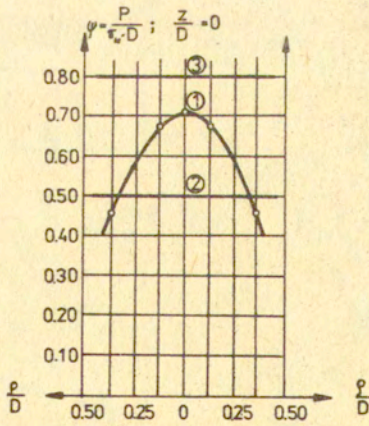
Czujniki magnetosprężyste o konstrukcji pokazanej na rys.40 stosowano do pomiarów rozkładu parć cementu na ściany i dno żelbetowego silosu o pojemności 5000 m^3 [34,36]. Schemat rozmieszczenia 15 czujników wzdłuż czterech tworzących walcowej ściany silosu oraz 9 czujników wzdłuż prostopadłych średnic jego dna pokazano na rys.41. Zmierzone wartości obciążeń działających na dno silosu w trakcie jego sukcesywnego napełniania przedstawiono na rys.42. Na osi rzędnych odkładano bezwymiarowe wartości naprężeń normalnych odniesione do iloczynu ciężaru objętościowego cementu i średnicy silosu. Na osi odciętych odłożono bezwymiarową wartość promienia silosu odniesioną do jego



Rys. 41

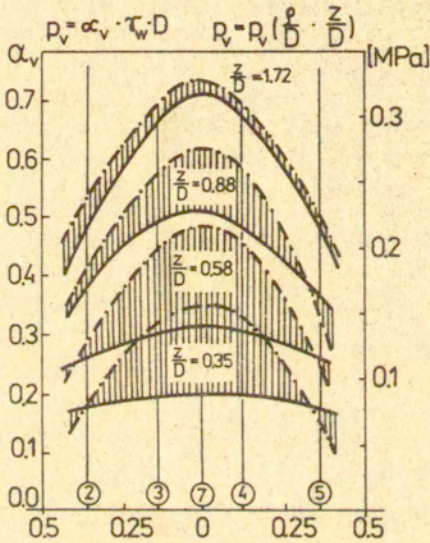


Rys. 42



Rys. 43

średnicy. Parametr z/H oznacza stopień napełnienia silosu i jest określony ilorazem odległości "z" powierzchni składowanego cementu od górnej krawędzi silosu do jego całkowitej wysokości. Porównanie zmierzonych (1) rozkładu parcia cementu na dno całkowicie napełnionego silosu z wynikami obliczeń według Janssena przedstawiono na rys.43. Teoria Janssena przewiduje równomierny rozkład parcia na dno silosu i przyjmując ciężar objętościowy $\gamma_0 = 1200 \text{ kg/m}^3$, kąt tarcia wewnętrznego $\rho = 25^\circ$ i współczynnik tarcia o ściany silosu $f = 0,2217$ dostaniemy wartość bezwymiarowego nacisku $\psi = 0,5$ (linia 2), natomiast zakładając $\gamma_0 = 2000 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 40^\circ$ i $f = 0,364$ naciski na dno silosu będą równe $\psi = 0,8$ (linia 3). Średnie wartości stałych materiałowych cementu określono w pracy [36] na: $\gamma = 1650 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 20^\circ + 35^\circ$, $f = 0,35$. W momencie rozpoczęcia opróżniania parcie na dno silosu ulega zwiększeniu w centralnej części i zmniejszeniu przy ścianie silosu (rys.44). Im mniejsze napełnianie silosu, określone głębokością napełnienia "z" liczoną w tym przypadku od dna silosu, tym większe względne zmiany nacisków w fazie opróżniania. Liniami przerywanymi zaznaczono naciski według Janssena obliczone dla średnich wartości stałych dla cementu (podanych wyżej). Stwierdzone w pracy [36] zwiększenie parcia na dno silosu w fazie opróżniania w stosunku do parcia statycznego jest sprzeczne z wynikami innych prac doświadczalnych [37], w których mierzono całkowite obciążenie dna silosu (wypadkowa z rozkładu naprężenia). Wartości obciążeń po napełnieniu (d_s) i po rozpoczęciu opróżniania (d_k) dla silosów o różnej smukłości θ zdefiniowanej jako stosunek wysokości H słupa materiału sypkiego do promienia hydraulicznego jego przekroju poprzecznego r_h przedstawiono na rys.45 a) dla dna płaskiego. Stosunek całkowitego obciążenia statycznego dna silosu do obciążenia kinematycznego przedstawiono na rys.45 b) jako funkcję smukłości silosu. Im wyższe silosy (przy tej samej średnicy) tym większe obserwuje się zmniejszenie wartości całkowitego obciążenia silosu w momencie rozpoczęcia jego opróżniania. Rzykładowy wykres wypadkowego obciążenia dna silosu jako funkcji czasu w fazie napełniania i opróżniania przedstawiono na rys.46 [37]. Rozkład bezwymiarowego parcia ψ odniesiony do iloczynu ciężaru objętościowego cementu γ i średnicy silosu D przedstawiono na rys.47 jako funkcję odległości "z" powierzchni nasypanego cementu



— napór

- - - opróżnianie

napór obliczony wg. Janssena dla:

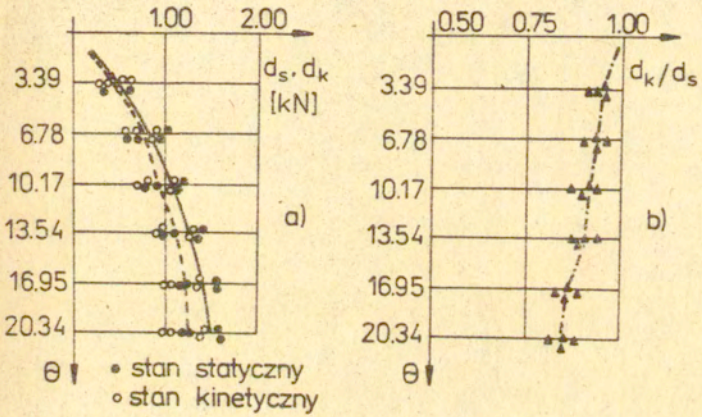
$\tau_0 = 1.65 \text{ T/m}^3$

$k = 3.50$

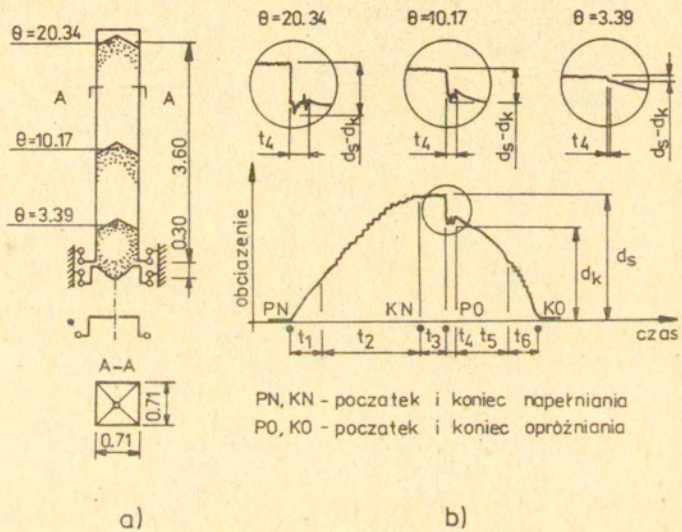
$\varphi = 31^\circ$

$f = 0.35$

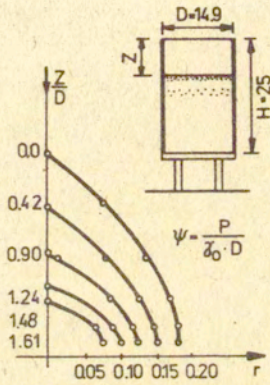
Rys. 44



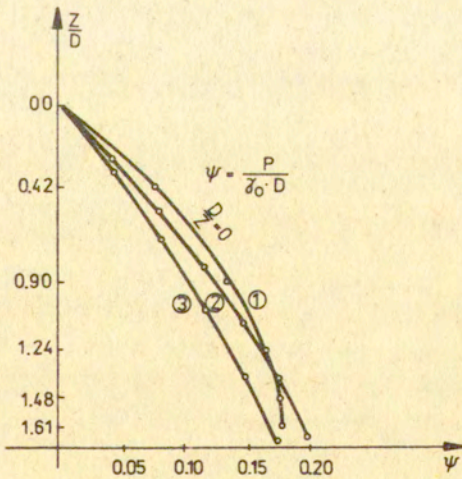
Rys. 45



Rys. 46



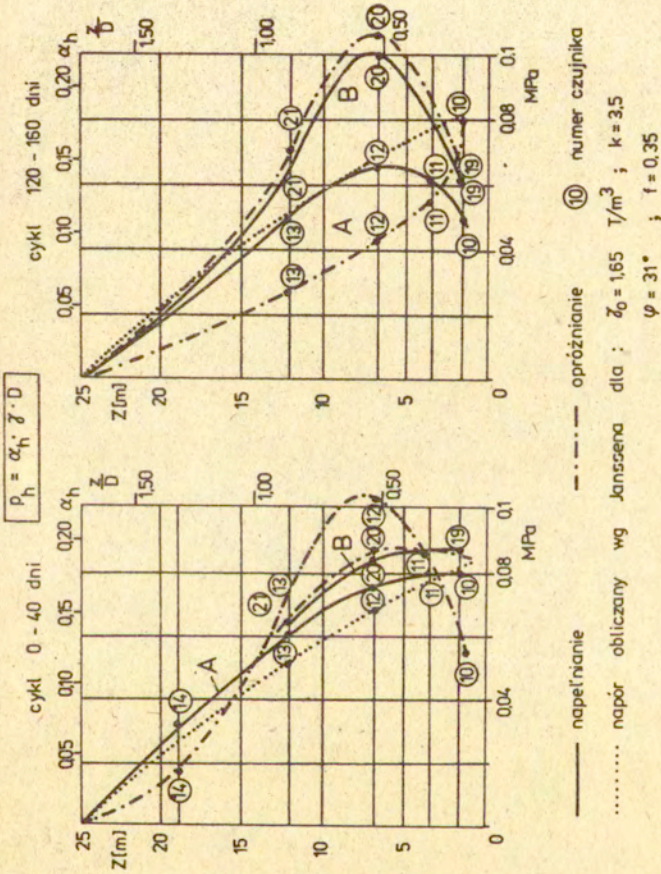
Rys. 47



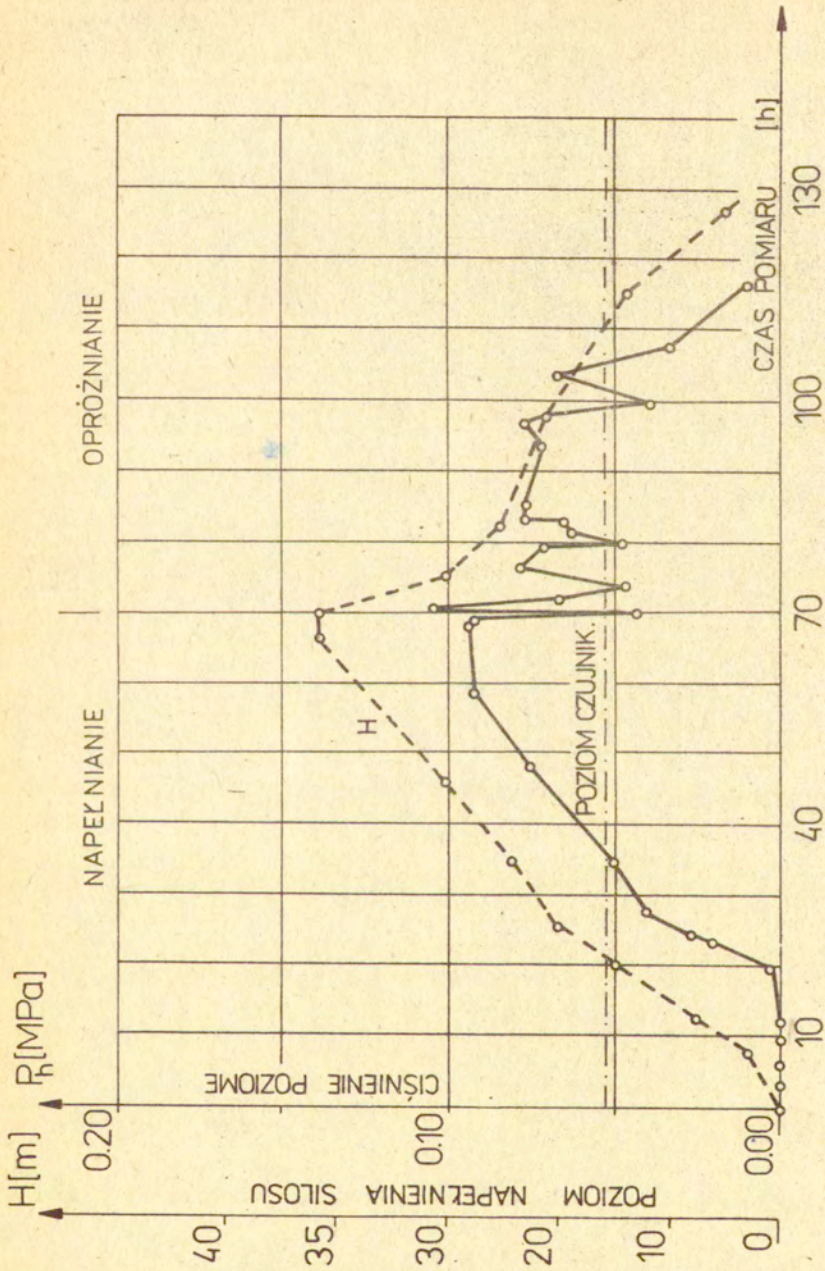
Rys. 48

od górnej krawędzi silosu odniesionej do jego średnicy. Rozkłady parcia wykonano po zakończeniu procesu napełniania do określonej wartości stosunku z/H . Porównanie zmierzonego rozkładu parcia dla całkowicie napełnionego silosu (linia 1) z wynikami obliczeń według teorii Janssena przedstawiono na rys.48. Linię (2) otrzymano dla stałych materiałowych równych $\gamma=1200 \text{ kg/m}^3$, $\rho=25^\circ$, $f=0,2217$, a linię (3) dla wartości $\gamma=2000 \text{ kg/m}^3$, $\rho=40^\circ$, $f=0,364$. Rozkład parcia ulega zmianie w fazie opróżniania silosu. Zmiany te określono doświadczalnie dla dwóch różnych cykli eksploatacyjnych silosu, pierwszego w którym napełnianie i opróżnianie obejmowały pierwsze czterdzieści dni od rozpoczęcia obserwacji i drugiego od 120-tego do 160-tego dnia. Wyniki doświadczeń przedstawiono na rys.49, zaznaczając wskazania czujników położonych wzdłuż przeciwnych tworzących silosu na przecięciu z płaszczyzną prostopadłą do średnicy dna silosu, wzdłuż której umieszczone są niesymetrycznie położone otwory wysypowe (porównaj rys.41). Różnice rozkładu parcia statycznego i dynamicznego dla dwóch przeciwnych tworzących ściany silosu wynikają z niesymetrycznego napełniania i opróżniania. Liniami ciągłymi zaznaczono parcie statyczne po zakończeniu napełniania do wysokości 25 m, liniami kreska-kropka zaznaczono zmierzone parcie w momencie rozpoczęcia opróżniania. Podane na rysunku cyfry obok punktów pomiarowych oznaczają numer czujnika zgodny z rys.41. Rozkłady obliczone według Janssena, przy założeniu $\gamma=1650 \text{ kg/m}^3$, $\rho=31^\circ$, $f=0,35$ zaznaczono na rys.49 liniami kropkowanymi.

Zastosowanie ciągłej rejestracji pomiaru parcia materiału sypkiego na ściany silosu pozwoliło zaobserwować pulsacje tego parcia w trakcie opróżniania, które mogą wprowadzać dodatkowe, duże błędy pomiarowe przy stosowaniu dyskretnej rejestracji odczytów wskazań w określonych odstępach czasu. Pulsacje te związane są z zakłóceniem jednorodnego wypływu materiału sypkiego z silosu. Rejestrując, jak to pokazano na rys.50 [38], wskazania określonego czujnika w fazie napełniania żelbetowego silosu cementem obserwujemy monotoniczny wzrost parcia poziomego na ścianę silosu, proporcjonalny do wysokości jego napełnienia. Po napełnieniu silosu rozpoczęto jego opróżnianie i w tym momencie nastąpił spadek ciśnienia wskazywanego przez obserwowany czujnik. Dopiero w chwilę później zaobserwowano zwiększenie ciśnienia ponad



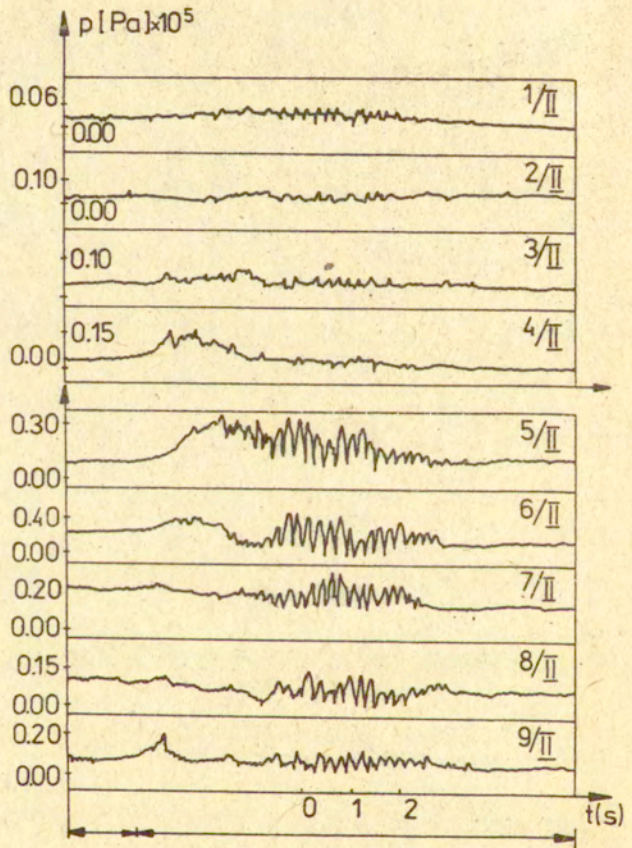
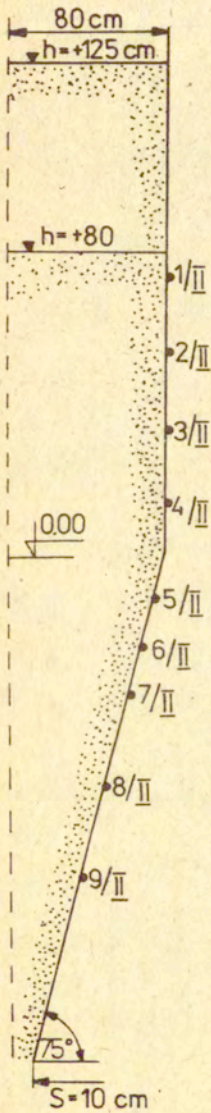
Rys.49



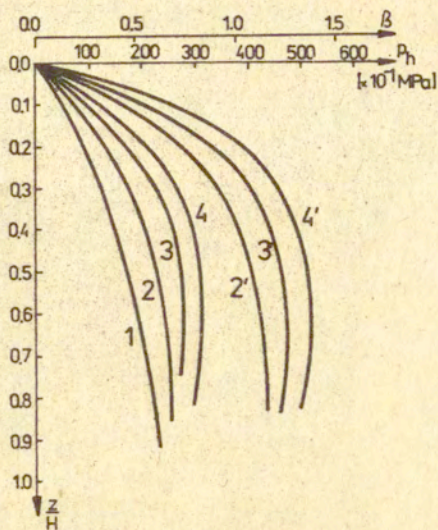
Rys.50

największą wartość zarejestrowaną w fazie napelniania. Przy dalszym opróżnianiu silosu obserwuje się zmniejszanie parcia, ale oscylacje są bardzo wyraźne.

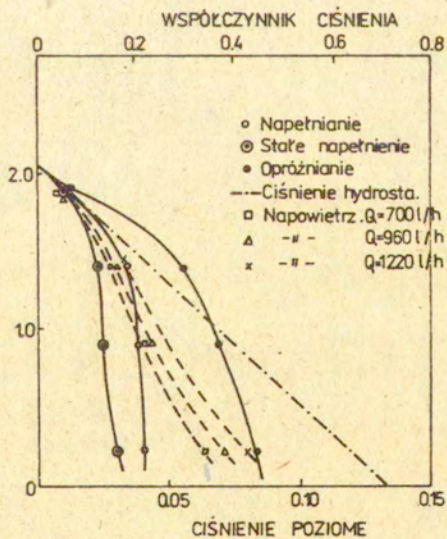
Wskazania czujników magnetosprężystych umocowanych na ścianie stalowego modelu silosu przedstawiono na rys.51. Zapisy zmian parcia poziomego dla 9 czujników jako funkcja czasu w trakcie opróżniania silosu od poziomu $h=125$ cm do $h=80$ cm pokazują bardzo wyraźne oscylacje, które świadczą o drganiach płaszcza silosu. Amplituda tych pulsacji jest największa przy przejściu z walcowej do stożkowej części silosu. Rozkład parć materiału będzie w tym przypadku zależał od przyjętego sposobu interpretacji wyników. Można bowiem przyjmować maksymalne lub średnie wartości zarejestrowanych przebiegów doświadczalnych. Jest to niewątpliwie jedna z przyczyn różnic wyników doświadczalnych przedstawianych przez różnych autorów. Jednym ze sposobów konstruowania wykresu parć osrodka sypkiego na ścianę silosu jest rysowanie obwiedni największych wartości zarejestrowanych przez czujniki rozmieszczone na różnych wysokościach w pewnym przedziale czasu. Technikę taką zastosowano [39] w badaniach wpływu pochylenia ścian silosu na rozkład parcia pszenicy na ścianki stalowego modelu silosu o średnicy 50 cm i wysokości 140 cm. Pomiar parć przeprowadzono czujnikami magnetosprężystymi o średnicy 89 mm przytwierdzonymi w dziesięciu miejscach na różnej wysokości wzdłuż tworzącej ściany silosu. Wykresy parcia statycznego zbudowano w oparciu o wyniki jednoczesnego pomiaru wszystkich czujników. Natomiast rozkład parcia dynamicznego przedstawiono w postaci obwiedni maksymalnych wartości wskazywanych przez poszczególne czujniki w początkowym okresie po rozpoczęciu opróżniania. Wyniki dla trzech rozpatrywanych kształtów komory silosu przedstawiono na rys.52. Rozkład według Janssena obliczony przy założeniu ciężaru objętościowego $\gamma=7600$ kN/m³, kąta tarcia wewnętrznego 34° , współczynnika tarcia pszenicy o ścianę silosu $f=0,306$, przedstawia krzywa 1. Statyczna krzywa (2) i obwiednia największych wartości parcia dynamicznego (2') otrzymane zostały dla silosu zbieżnego ku górze (kąt pochylenia ściany 1°). Linie (3) i (3') przedstawiają rozkład parcia statycznego i dynamicznego dla silosu walcowego. Wykresy (4) i (4') odnoszą się do silosu o rozbieżności ścian ku górze (kąt nachylenia ściany $+1^\circ$). Stwierdzono, że nieznaczące



Rys. 51



Rys. 52

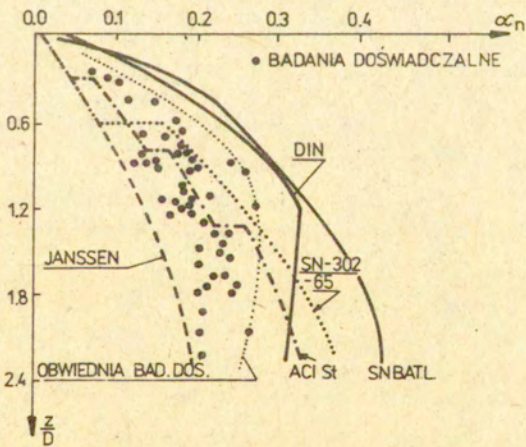
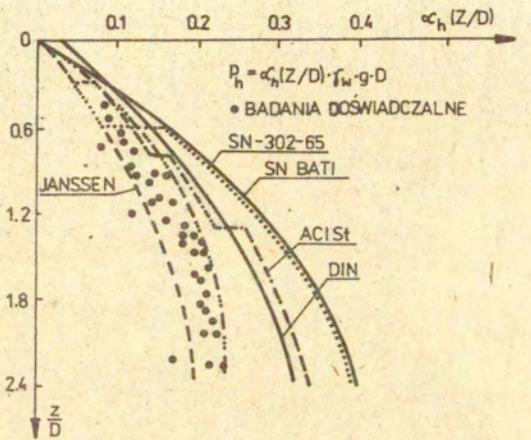


Rys. 53

pochylenie ścian wpływa w istotny sposób na wartości naporu działającego na ściany.

Wyniki badań doświadczalnych wpływu prędkości napełniania i przedmuchiwanego składowanego materiału przy pomocy sprężonego powietrza przedstawiono w pracy [40]. Pomiarów wykonano przy pomocy czujników magnetycznych przyczepionych wzdłuż tworzącej walcowego modelu silosu wykonanego z blachy stalowej i wypełnionego cementem. Badania obejmowały zmierzenie parcia bezpośrednio po całkowitym napełnieniu silosu, zmierzenie ustalonego rozkładu parcia występującego po pewnym czasie od zakończenia napełniania, zmierzenie rozkładu parcia w trakcie przedmuchiwanego cementu sprężonym powietrzem o różnej wydajności przepływu, oraz rejestrację parcia dynamicznego. Przykładowe wyniki pomiarów pokazano na rys.53. Otrzymano je przy prędkości napełniania silosu równej 0,085 cm/s. Przedmuchiwanie cementu w silosie powoduje wzrost parcia na ściany silosu zależny od wydatku wtłaczanego powietrza. Wykresy parcia statycznego i dynamicznego z rys.53 mają zwiększające się wartości przy zbliżaniu się do dna silosu. Przedstawiony na rys.53 wpływ napowietrzania cementu na rozkład parcia na ścianę modelu silosu jest wyraźny. Przeprowadzone natomiast analogiczne badania na silosie w skali naturalnej [41] nie wykazały wpływu tego efektu na rozkład parcia.

Rozkłady parcia statycznego i dynamicznego zmierzone na ścianach silosu żelbetowego w naturalnej skali pokazano na rys.54 [42]. Pomiarów wykonano przy pomocy czujników magnetycznych przyczepionych na różnych wysokościach wzdłuż czterech tworzących leżących na wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Silos wypełniony był cementem. Górna część rysunku 54 przedstawia punkty doświadczalne otrzymane z czujników po napełnieniu silosu z zaznaczoną obwiednią maksymalnych wartości parcia statycznego. Pozostałe krzywe przedstawiają parcie według Janssena oraz według normy radzieckiej SN 302-65, amerykańskiej ACI, niemieckiej DIN 1055 i francuskiej SNBATI. Punkty doświadczalne i obwiednię ich maksymalnych wartości występujących w trakcie opróżniania silosu przedstawiono na dolnej części rys.54. Zaznaczono również obliczeniowe rozkłady parcia dynamicznego według wymienionych wyżej norm wraz ze statycznym rozkładem Janssena. Rozrzuty punktów doświadczalnych otrzymanych z różnych pomiarów wynikają zarówno z

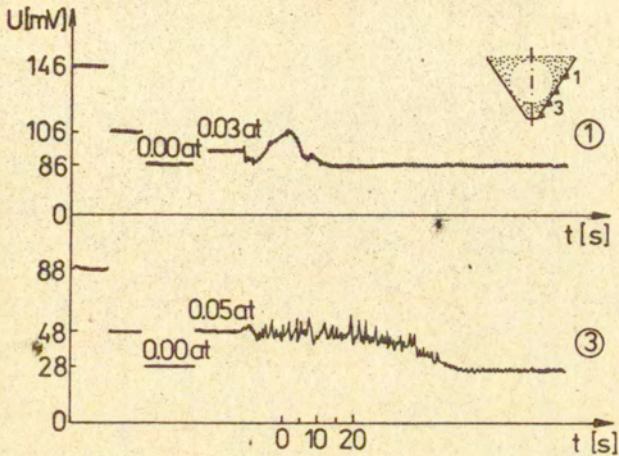


Rys. 54

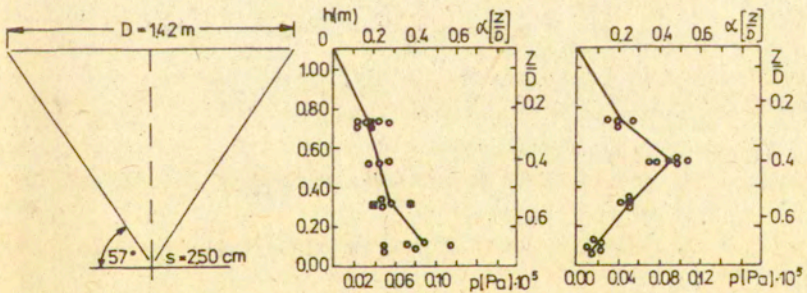
błędów pomiarowych jak i innego upakowania ośrodka sypkiego i innego charakteru jego przepływu. Przedstawienie w taki sposób wyników pomiarów pozwala na ocenę obliczeniowych parć ośrodków sypkich.

Czujniki magnetosprężyste były również wykorzystywane do pomiarów parcia materiału sypkiego na ścianę leja o kącie pochylenia ściany 57° w stosunku do poziomu [43]. Wzdłuż płaskiej ściany klinowego otworu wysypowego umieszczono cztery czujniki, które przy pomocy odpowiedniej aparatury pozwalały na ciągłą rejestrację wyników pomiaru w trakcie zasypywania i opróżniania. Zasobnik klinowy o szerokości 1,44 m i długości 3 m wykonano z blachy stalowej i zasypywano żwirkiem płukanym o ciężarze objętościowym 1600 kg/m^3 , kącie tarcia wewnętrznego 33° i takim samym kącie tarcia żwirku o ścianę silosu. Przykład zarejestrowanych zmian wskazań dwóch czujników po napełnieniu i w trakcie przepływu materiału przedstawiono na rys.55. Po rozpoczęciu opróżniania obserwuje się opisywaną już pulsację wskazań czujników, przy czym ich amplituda jest największa dla czujnika nr.3. Punkty doświadczalne z różnych pomiarów i ich aproksymację odcinkami linii prostych pokazano na rys.56 dla parcia statycznego i dynamicznego przy ustalonym wpływie. Punkty doświadczalne parcia dynamicznego przedstawiają usrednione wartości z pulsacyjnych wskazań rejestrowanych w trakcie wpływu materiału.

Czujniki elektryczne o zasadzie działania piezoelektrycznej czy pojemnościowej nie znalazły zastosowania w badaniach parć ośrodków sypkich na ściany silosu. Czujniki piezoelektryczne produkowane są przez wiele firm w wersji do pomiaru dynamicznych zmian działających na nie nacisków, ale w przypadku konieczności przeprowadzenia również pomiaru statycznego, jak to ma miejsce w silosach, wykazują istotne wady. Czujniki pojemnościowe, stosowane obecnie przez niektóre firmy jako precyzyjne wskaźniki przemieszczeń liniowych, również nie znalazły zastosowania w badaniach silosów. Podobnie wygląda również wykorzystanie czujników strunowych, których opisy w wersji dostosowanej do pomiarów nacisków działających w gruntach można znaleźć w literaturze [13,18], ale ich zastosowania w tej dziedzinie są sporadyczne.



Rys. 55



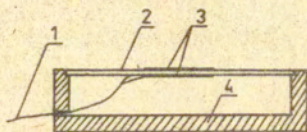
$$p = \alpha \cdot \gamma_0 \cdot D$$

$$\gamma_0 = 160 \text{ T/m}^3$$

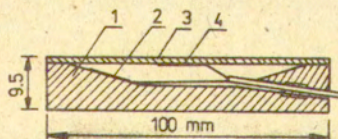
Rys. 56

Ostatnią grupę czujników elektrycznych stanowią urządzenia, w których zasadniczym elementem pomiarowym jest tensometr elektrooporowy. Do grupy tej można zaliczyć czujnik przedstawiony na rys.20, w którym elementem czynnym jest membrana z naklejonym układem tensometrów. Zasada ta była wielokrotnie powielana w różnych wersjach konstrukcyjnych. Stosowano puszkę prostej konstrukcji z tensometrami naklejonymi po obu stronach cienkiej membrany [44] dzięki czemu zwiększano czułość tego dynamometru, ale ograniczono jego zastosowanie wykluczając możliwość pomiaru w przypadku przesuwu ośrodka sypkiego względem czujnika jak to ma miejsce w silosach. Czujnik w takiej wersji (rys.57) stosowano do pomiarów pionowego nacisku wywieranego przez piasek, a górna powierzchnia prostokątnej membrany zabezpieczona była cienką gumą. Dokładność pomiarów tego urządzenia wynosiła 1 kPa. Czujniki o podobnej zasadzie z tensometrem czynnym przyklejonym do wewnętrznej strony membrany i tensometrem kompensacyjnym przyklejonym do korpusu stosowano w wielu pracach do badań parcia grunty. Przykład takiej konstrukcji przedstawiono na rys.58 [13]. Stosowano również rozwiązania z dwiema membranami oddzielonymi cienkim pierścieniem [45]. Na wewnętrznej stronie membran przyklejono spiralne tensometry elektrooporowe. Czujnik ten w zakresie od 0 do 0,7 MPa umożliwiał pomiary z dokładnością do 1,4 kPa. Inne rozwiązanie różniące się rozmieszczeniem tensometrów elektrooporowych przedstawiono na rys.59 [15]. Całkowita wysokość czujnika wynosi 9,5 mm, średnica zewnętrzna 76 mm, a średnica membrany 50 mm. Jeden z tensometrów, przyklejony w centralnym miejscu membrany jest rozciągany pod naciskiem gruntu, drugi natomiast przyklejony jest przy krawędzi zamocowania wzdłuż średnicy i przy ugięciu membrany do środka jest sciskany. Po włączeniu tensometrów w układ mostkowy zwiększa się czułość czujnika przy jednoczesnym kompensowaniu zmian temperatury. Jest to niewątpliwa zaleta czujnika do pomiaru parcia ośrodków sypkich w silosach, gdzie można spodziewać się istotnych zmian temperatury w trakcie cyklu pomiarowego. Przyklejenie obu tensometrów na membranie zapewnia, podobnie jak w rozwiązaniu z rys.57, precyzyjniejszą kompensację temperatury niż to jest możliwe w rozwiązaniu przedstawionym na rys.58.

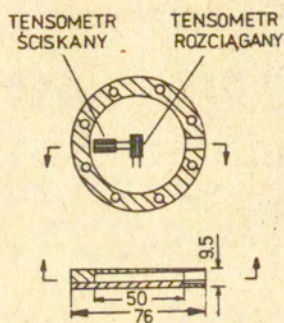
Czujniki zbudowane na zasadzie membrany, której odkształcenie



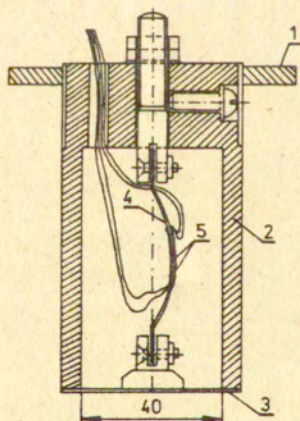
Rys. 57



Rys. 58



Rys. 59

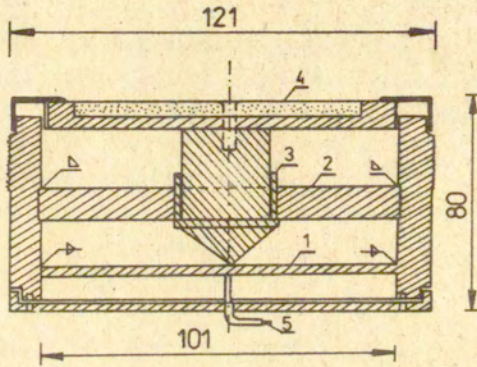


Rys. 60

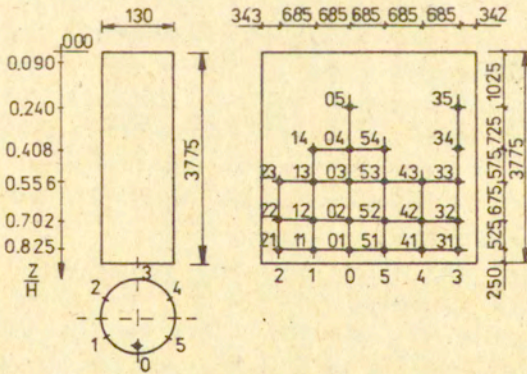
mierzy się przy pomocy układu tensometrów elektrooporowych są powszechnie stosowane do pomiaru ciśnień w różnych ośrodkach. Jest to urządzenie proste, o małych gabarytach i masie. Stosuje się je w badaniach dynamicznych i statycznych. Zasady konstruowania takich czujników oparte na rozwiązaniach teoretycznych i przeprowadzonych weryfikacjach doświadczalnych omówiono w pracy [46]. Warto podkreślić, że zaleca się tam przykleić cztery tensometry oporowe jak najbliższej sztywnego podparcia krawędzi membrany, które rozstawione będą co 90° . Układ taki pokazuje znacznie mniejsze błędy w przypadku niejednorodnego rozkładu obciążenia działającego na czujnik niż przy przyklejeniu tensometru w centralnym miejscu membrany.

Czujniki elektryczne do pomiaru parcia gruntu lub ośrodka sypkiego budowane były w różnych odmianach. Zawsze jednak czujnik ma elastyczną membranę. W poprzednio omówionej wersji odkształcenia membrany mierzono tensometrami elektrooporowymi, z których chociaż jeden był naklejony bezpośrednio na membranę. Rozpowszechniona jest również druga wersja, w której element pomiarowy z naklejonymi tensometrami mierzy ugięcia membrany. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 60 [47]. Ugięcia membrany (3) określa się na podstawie pomiaru tensometrami elektrooporowymi (5) odkształceń po obu stronach wyginanej blaszki stalowej (4). Średnica korpusu (2) czujnika wynosiła 50 mm, a jego wysokość 95 mm. Czujnik stosowano do pomiarów parcia gruntu na ściany oporowe. Mierzone ciśnienia były w granicach do 6,5 kPa, a największa czułość czujnika wynosiła 0,1 kPa. Zbudowano dwie wersje tego czujnika o różnej sztywności membrany uzyskując stosunek jej średnicy do ugięcia odpowiednio 12200 i 56000.

Zasada pracy czujnika tensometrycznego pokazanego na rys. 61 [48] jest inna od omówionych poprzednio. Nacisk z membrany (4) przenoszony jest przy pomocy sztywnego trzpienia (3) prowadzonego w płytce (2) na beleczkę pomiarową (1), na której naklejone są tensometry elektrooporowe. Przewody (5) wyprowadzone przez dolną osłonę czujnika połączone są mostkami tensometrycznymi. Czujnik o średnicy 121 mm, wysokości 80 mm mocowany był przy pomocy zewnętrznego gwintu na jego korpusie w stalowych gniazdach zatopionych w ścianie żelbetowego modelu silosu o średnicy wewnętrznej 1,25 m i wysokości 3,775 m. Rozmieszczenie czujników

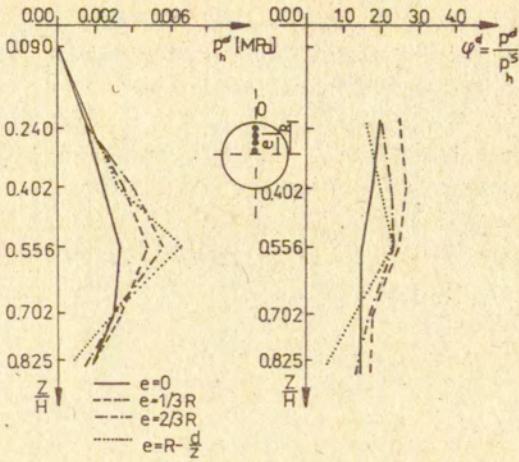


Rys. 61

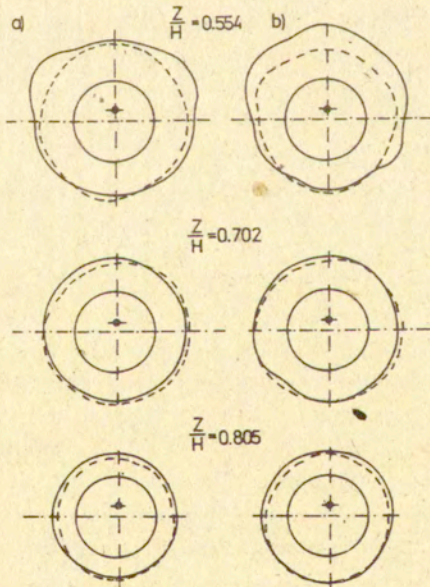


Rys. 62

wzdłuż sześciu, równomiernie rozłożonych tworzących silosu pokazano, w rozwinięciu jego ściany, na rys.62. Silos zasypywano pszenicą o ciężarze objętościowym $\gamma=8 \text{ MN/m}^3$ i kącie tarcia wewnętrznego $\rho=30^\circ$. W płaskim dnie silosu umieszczone były otwory wysypowe w różnej odległości od osi silosu tak, że możliwe były pomiary parć na jego ścianę przy symetrycznym i niesymetrycznym opróżnianiu. Celem pracy [48] było wyznaczenie obwodowych i osiowych rozkładów parcia dynamicznego w trakcie opróżniania silosu przez otwory w różnej odległości "e" od osi walcowej komory. Rozkład parcia zmierzony wzdłuż tworzącej leżącej w płaszczyźnie przechodzącej przez otwory wysypowe pokazano na rys.63., a obwodowe rozkłady dla trzech przekrojów umieszczonych w różnej odległości od górnej krawędzi silosu pokazano na rys.64. Wykresy zarejestrowane w chwili początkowej opróżniania przez otwór w odległości $R/3$ (R - promień walcowej komory) pokazano linią ciągłą na rys.64 a. Natomiast obwiednię największych wartości parcia zarejestrowanych w trakcie opróżniania przedstawiono linią ciągłą na rys.64 b. Liniami przerywanymi przedstawiono obwodowe rozkłady parcia zarejestrowane w trakcie opróżniania symetrycznego przez otwór centralny. Wpływ niesymetrycznego opróżniania jest wyraźnie widoczny na obu rysunkach. Wartości parć ulegają zwiększeniu przy opróżnianiu niesymetrycznym w stosunku do symetrycznego wpływu. Powierzchnia sztywnej membrany zastosowanego w tych badaniach czujnika pokryta była warstwą zaprawy cementowej, żeby zapewnić podobne warunki tarcia jak na ścianie silosu. Uwzględniając działanie na membranę siły tarcia należy rozpatrzyć ujemne cechy czujnika wynikające z przyjętego rozwiązania jego mechanicznej części. Membrana pod wpływem siły tarcia i na skutek nierównomiernego rozkładu nacisków poziomych na jej powierzchnię będzie się przechylać powodując wzrost siły tarcia w części prowadzącej trzpień jak i w górnej części na styku z korpusem. Czujnik taki będzie wskazywał niewielką histerezę przy jego cechowaniu równomiernie rozłożonymi naciskami prostopadłymi do powierzchni membrany, ale obecność sił tarcia czy nierównomierny nacisk będzie powodować dużą histerezę i zmianę charakterystyki czujnika. Brak szczegółowych danych o sposobie cechowania tego typu czujnika uniemożliwia ocenę poprawności jego wskazań. Można jednak stwierdzić, że przyjęte



Rys. 63



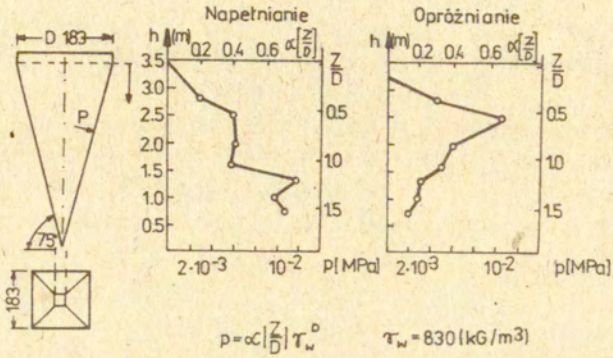
Rys. 64

rozwiązanie mechanicznej części czujnika będzie wpływać na jego charakterystykę i powodować systematyczne błędy wskazań.

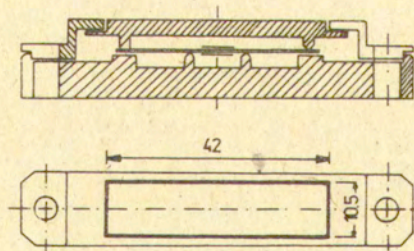
Czujnik o zbliżonej konstrukcji stosowano do pomiarów rozkładu parcia na ścianę leja w kształcie ostrosłupa [49]. Średnica czujnika wynosiła 38 mm, a elementem pomiarowym była blacha stalowa o grubości 1,5 mm, której ugięcie przenoszone przez sztywny pręt z membrany nie przekraczało 0,03 mm. Wynik pomiarów dla leja o kącie rozwarcia ścian 30° , napełnionego mielonym węglem o ciężarze objętościowym $\gamma=830 \text{ kg/m}^3$, kącie tarcia wewnętrznego $\rho=45^\circ$ i kącie tarcia o stalową blachę leja $\delta=16^\circ$, przedstawiono na rys.65. Zaobserwowane w trakcie pomiarów nieregularności rozkładów parć statycznych wskazują na duży błąd względny tego typu czujników tensometrycznych, który również wynika z wad mechanicznej części zastosowanego rozwiązania.

Czujnik tensometryczny stosowany w pracy [50] do pomiarów parcia gruntu miał podobną zasadę jak konstrukcja z rys.61. Elementem pomiarowym była również prostokątna beleczka, na którą naklejono, po obu jej stronach tensometry elektrooporowe. W rozwiązaniu przedstawionym na rys.66 ugięcie sztywnej membrany powoduje wygięcie beleczki pomiarowej podpartej i naciskanej za pośrednictwem zaokrąglonych stempli. Czujnik dostosowany był do pomiaru ciśnień w zakresie do 3 N/cm^2 . Analogiczne rozwiązanie czujnika tensometrycznego stosowano [18] do pomiarów parcia zboża na ścianę silosu w zakresie od 0 do 15 kPa. Czujnik ten (rys.67) składa się z dwóch równoległych płyt kwadratowych, między którymi jest beleczka pomiarowa z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi. Powierzchnia czujnika wynosi 100 cm^2 , a wysokość 1,5 cm. Błąd wskazań tak zbudowanego czujnika zawarty jest w przedziale od 5 do 18%. Jest to wartość wynikająca z różnicy sztywności czujnika i osrodka sypkiego, w którym jest on umieszczony. Dodatkowy błąd będzie powstawał na skutek tarcia na podporach beleczki, ale w porównaniu z rozwiązaniem z rys.61, w tym przypadku tarcie mechanicznych części czujnika będzie miało znacznie mniejszy wpływ na wyniki pomiarów.

Rozwiązania konstrukcyjne wszystkich przedstawionych dotychczas czujników umożliwiały pomiar jedynie prostopadłej składowej nacisków działających na membranę czujnika. W przypadku gdy na membranę czujnika działa jeszcze siła tarcia nie jest możliwe jej

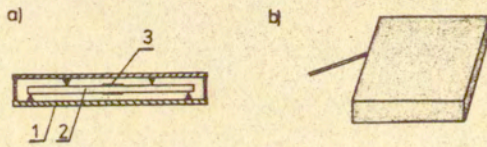


Rys. 65

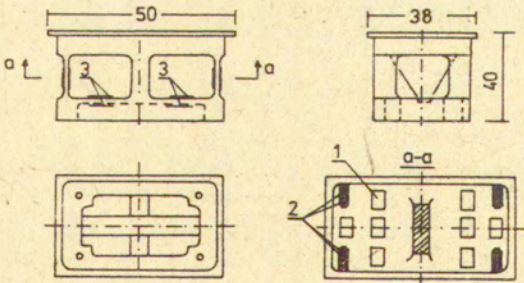


Rys. 66

zmierzenie przy pomocy tego typu urządzeń. Występowanie sił tarcia będzie natomiast powodować błędy wskazań czujników. W przypadku pomiarów parcia na ściany silosu uwzględnienie sił tarcia i możliwość ich pomiaru razem z pomiarem nacisków normalnych ma istotne znaczenie. Praktyczna realizacja pomiaru dwóch składowych, normalnej i stycznej, nacisków działających na czujnik jest znacznie bardziej skomplikowana. Przykład takiego rozwiązania przedstawia rys.68 zaczerpnięty z pracy [51]. Nacisk normalny i styczny działający wzdłuż dłuższego boku prostokątnej membrany przekazywany jest na elastyczne elementy pomiarowe, na których przyklejone są tensometry elektrooporowe. Membrana ma 50 mm długości i 38 mm szerokości. Wysokość czujnika wynosi 39 mm. Tensometry elektrooporowe (2), naklejone na pionowych słupkach pomiarowych wykorzystywane są do pomiaru wartości i przesunięcia w stosunku do osi czujnika, wypadkowej nacisków normalnych działających na membranę czujnika. Równomiernie rozłożony nacisk na membranę będzie powodował jednakowe wskazania wszystkich tensometrów (2) naklejonych na czterech elementach pomiarowych. Różnice we wskazaniach tych czujników, powodowane przechyleniem się membrany, umożliwiają określenie przesunięcia wypadkowej nacisku. Pomiar siły stycznej działającej na powierzchni membrany wykonuje się na podstawie odczytu wskazań tensometrów (3) naklejonych na poziomych elementach pomiarowych. Siła styczna działająca na powierzchni czujnika przenosi się na te elementy pomiarowe za pośrednictwem sztywnego, środkowego słupa. Dodatkowo, na wewnętrznej części membrany czujnika naklejonych jest sześć tensometrów kompensacyjnych (1). Tak więc, na powierzchniach czujnika nakleiono dwadzieścia tensometrów elektrooporowych, a pomiar normalnej i stycznej nacisków działających na powierzchnię czujnika określa się z różnej kombinacji odczytów wskazań poszczególnych tensometrów. Wersja czujnika przedstawiona na rys.68 dostosowana była do pomiaru nacisków normalnych w zakresie od 0 do 0,7 MPa i stycznych od 0 do 0,175 MPa. Dokładność pomiaru składowej normalnej określono na 1% , stycznej na 2,5% , a przesunięcia wypadkowej nacisków w stosunku do osi czujnika na 5%. Układ pomiarowy tego czujnika jest jednak bardzo skomplikowany i wymaga stosowania wielokanałowej aparatury tensometrycznej. Należy również uwzględnić, że czujnik określa tylko wartości składowej



Rys. 67



Rys. 68

stycznej. Jej kierunek działania musi być zgodny z dłuższą krawędzią membrany czujnika.

Czujnik tensometryczny do pomiaru składowej normalnej i stycznej parcia osrodka sypkiego w silosach opracowano i opatentowano w Holandii w 1961 roku [51]. Zasadę działania i sposób umocowania czujnika na ścianie silosu pokazano na rys.69. Sztynna membrana (A) czujnika jest zamocowana w otworze w ścianie silosu w taki sposób, że możliwe jest jej ugięcie pod działaniem parcia normalnego P jak i jej przesunięcie do dołu pod działaniem siły tarcia S. Naciski z membrany przenoszone są przez sztywny pręt (B) na element pomiarowy (C) w postaci płaskiej beleczki z naklejonymi czterema tensometrami (E), który jest sztywno zamocowany w obudowie (D) czujnika przykręconej do konstrukcji silosu. Czujnik jest tak przykręcony do ściany żeby jego beleczka pomiarowa (C) miała kierunek równoległy do znanego kierunku siły stycznej. Wskazania tensometrów elektrooporowych naklejonych po obu stronach belki pomiarowej będą jednakowe przy jej ugięciu pod działaniem siły normalnej P i przeciwnego znaku, gdy membrana czujnika będzie przemieszczana pod działaniem siły stycznej S (rys.70). Tensometry połączone są w układy mostkowe w ten sposób, że jeden z nich mierzy wartość i_1 proporcjonalną do sumy siły P i S:

$$i_1 = c_s \cdot S + c_p \cdot P,$$

a drugi do ich różnicy:

$$i_2 = c_s \cdot S - c_p \cdot P,$$

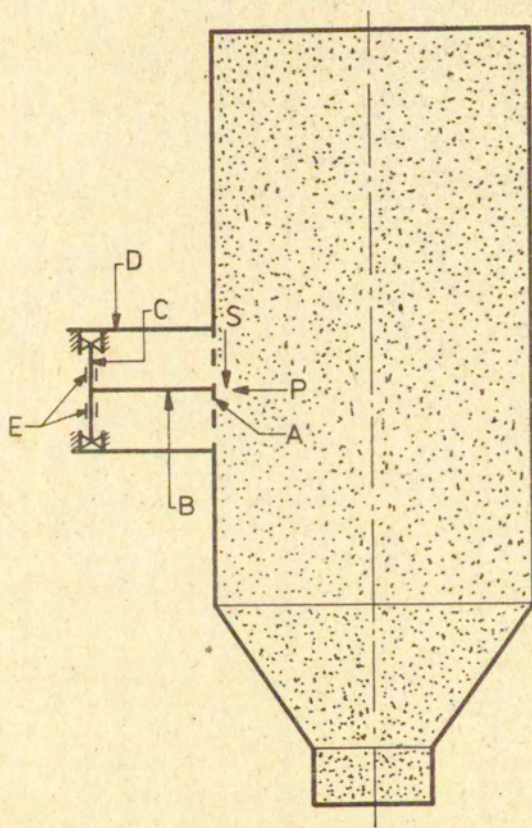
gdzie c_p i c_s są współczynnikami proporcjonalności między wskazaniami mierników i wartościami sił określonymi doświadczalnie przy oddzielnym cechowaniu najpierw znaną wartością siły P_0 , a następnie znaną wartością siły S_0 . Wartości współczynników wynoszą wówczas:

$$c_p = i_1^0 / 2 \cdot P_0, \quad c_s = i_2^0 / 2 \cdot S_0.$$

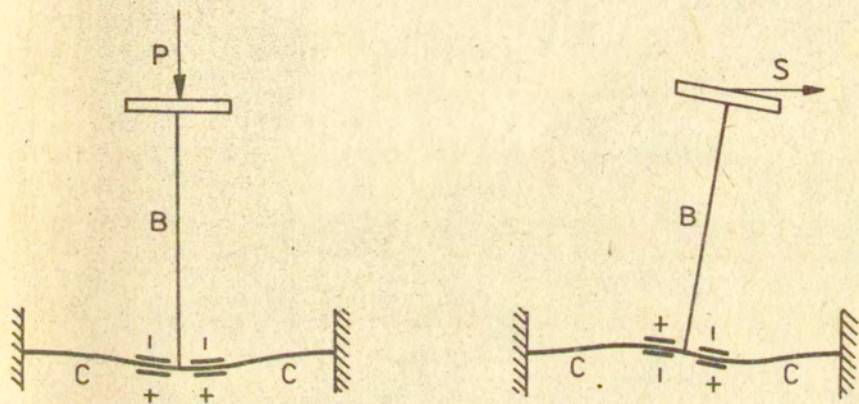
W przypadku gdy na czujnik działa jednocześnie wypadkowa nacisków normalnych P i naprężeń stycznych S, ich wartości określamy na podstawie odczytów wskazań obu mostków tensometrycznych z zależności:

$$P = (i_1 - i_2) / 2 \cdot c_p, \quad S = (i_1 + i_2) / 2 \cdot c_s.$$

W udoskonalonej wersji tego czujnika zastosowano element



Rys. 69, A - membrana, B - belka łącząca czujnik ze sprężystą membraną, C - sprężysty element z naklejonymi tensometrami, D - obudowa, E - tensometry, P - siła normalna, S - siła styczna.

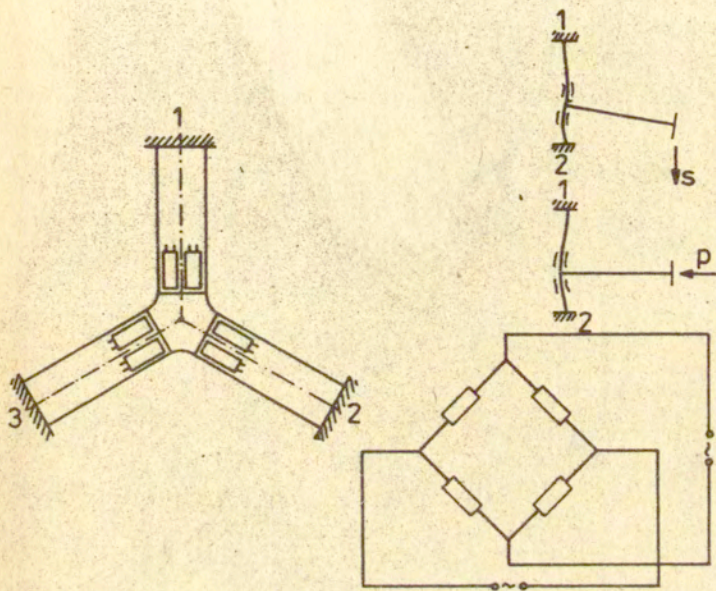


Rys. 70

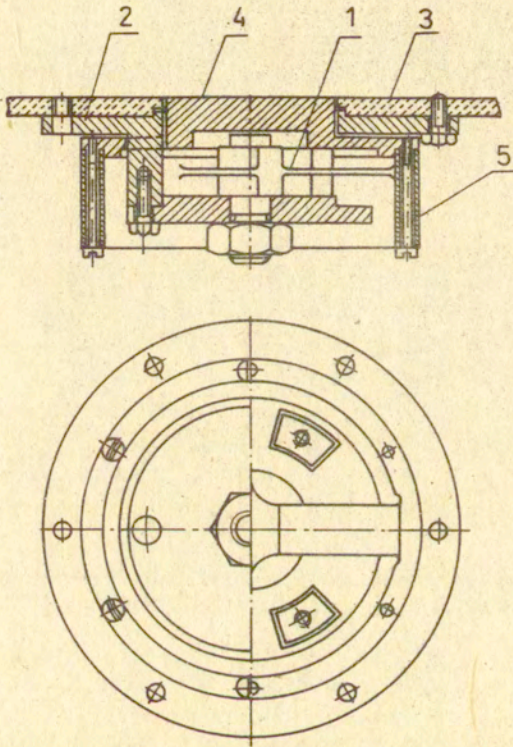
pomiarowy w postaci trójramiennej gwiazdy (rys.71). Odpowiednie połączenie tensometrów naklejonych po obu stronach ramion elementu pomiarowego umożliwia wyznaczenie kierunku i wartości wypadkowej parcia gruntu na ścianę silosu. Wersję konstrukcyjną czujnika z trzyramiennym elementem pomiarowym przedstawiono na rys.72. W rozwiązaniu tym środek trójramiennego elementu pomiarowego (1) jest połączony na sztywno z korpusem czujnika (2) przykręconym do zewnętrznej strony ściany silosu (3). Membrana (4) jest natomiast połączona z zewnętrznym pierścieniem (5) stanowiącym podparcie dla elementu pomiarowego. Czujnik jest osadzony w otworze ściany silosu w ten sposób, żeby jego czołowa powierzchnia leżała w płaszczyźnie wewnętrznej ściany, oraz żeby luz między otworem a czujnikiem umożliwiał przemieszczanie się membrany proporcjonalnie do działających sił. Jest to sprawa istotna, bowiem stwierdzono na podstawie doświadczeń, że istnieje możliwość tworzenia się sklepień opartych na ziarnach zaklinowanych w szczelinie między czujnikiem a ścianą. Dlatego też zwraca się uwagę [51], że luz powinien być jak najmniejszy i tylko taki, żeby zapewnić możliwość niezbędnych do pomiaru przemieszczeń.

Czujnik z elementem pomiarowym czteroramiennym w wersji pokazanej na rys.73 umożliwia bezpośredni odczyt poziomej i pionowej składowej siły tarcia S działającej na powierzchni membrany.

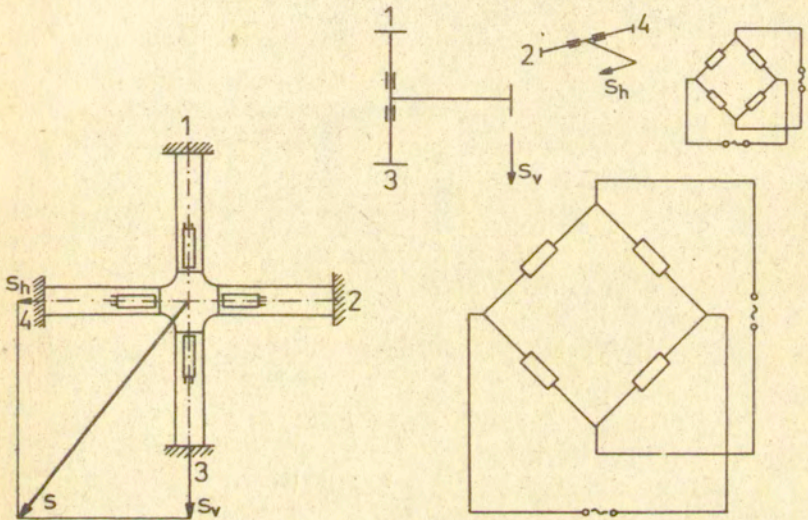
Czujniki elektryczne o konstrukcji umożliwiającej pomiar składowej normalnej i stycznej obciążenia ściany silosu dają podstawę do weryfikacji warunków brzegowych przyjmowanych do obliczeń konstrukcji silosu. Realizacja takich pomiarów jest jednak znacznie trudniejsza, wymaga precyzyjnego zamontowania czujnika w ścianie silosu, stosowania wielokanałowej aparatury tensometrycznej, precyzji wykonania mechanicznej i elektrycznej części czujnika oraz pracochłonnego przeliczania wyników. Publikacje, w których prezentowane są ewentualne wyniki zastosowań tego typu czujników nie są w Polsce dostępne. W cytowanej wyżej pracy [51] autor odwołuje się do monografii [52], w której zawarte są rezultaty pomiarów, ale mimo podjętych starań, wobec niepełnych informacji bibliograficznych nie udało się dotrzeć do tej pozycji. Przeprowadzenie miarodajnej oceny działania tego typu czujnika na podstawie otrzymywanych wyników pomiarów było więc niemożliwe.



Rys. 71



Rys. 72



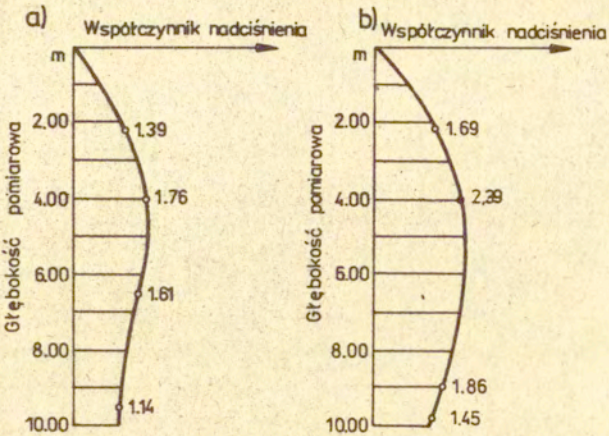
Rys. 73

3. Pośredni pomiar parcia materiału sypkiego na ściany silosu

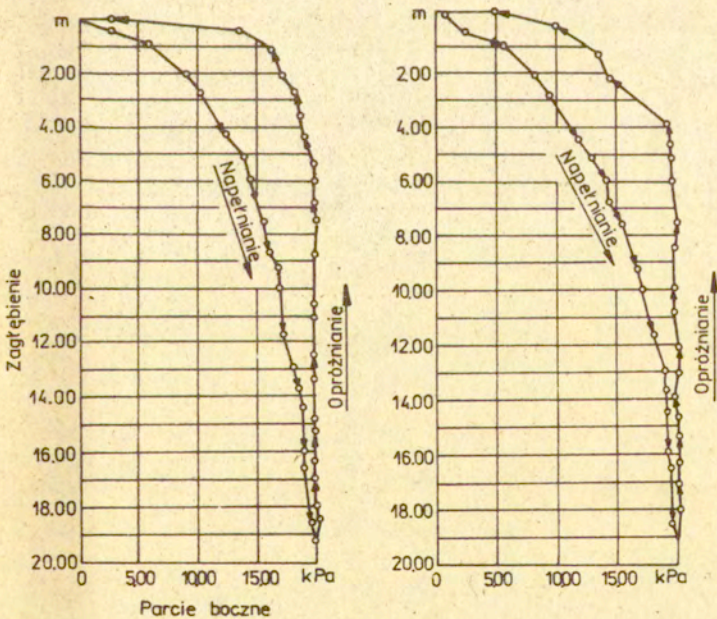
Pośrednia metoda oceny parcia materiału sypkiego na ściany silosu polega na obserwacji reakcji konstrukcji zbiornika w trakcie jego napełniania i opróżniania. Sposób ten stosowany był w badaniach istniejących silosów jak również w badaniach przeprowadzanych na modelach. Mierzono zwykle zmiany odkształceń płaszcza silosu lub też niektórych jego elementów.

W badaniach [3] dużych silosów o wysokości 10 m i kwadratowym przekroju o boku 4,1 m wykonanych z blachy stalowej wykorzystano technikę tensometryczną do pomiaru zmiany odkształceń na zewnętrznej stronie ściany silosu. Tensometry naklejono na czterech różnych wysokościach rejestrując ich wskazania w czasie napełniania i opróżniania silosu. Stosunek wartości zmierzonych przy opróżnianiu do wartości po napełnieniu traktowano jako współczynnik zwiększenia parcia dynamicznego. Otrzymane rezultaty dla dwóch badań przeprowadzonych na tym samym silosie zasypywanym zbożem przedstawiono na rys.74. Wartości zmierzone w dwóch seriach pomiarów wynosiły na tej samej wysokości silosu odpowiednio 1,39 i 1,69, 1,76 i 2,39, 1,14 i 1,45. Największa różnica jest około 35%. Różnice te wynikały prawdopodobnie z zakłóceń przepływu czy subtelnych zmian w sposobie napełniania i opróżniania.

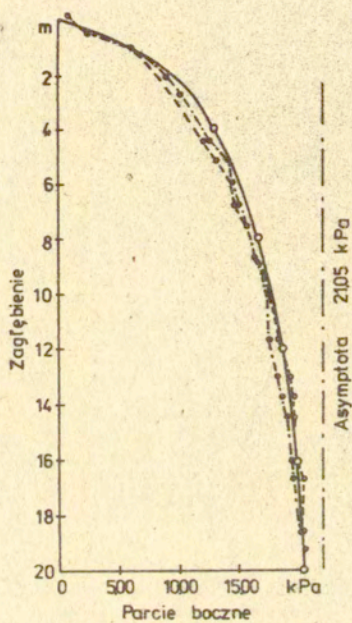
Podobne badania wykonano dla stalowych silosów zaopatrzonych w przewody odciążające. Dwa tensometry elektrooporowe naklejono blisko dna komory, jeden pionowo drugi poziomo. Rejestrowano zmiany odkształceń płaszcza silosu w trakcie napełniania i opróżniania zaznaczając punkty doświadczalne, przeliczone na parcie działające na ścianki, na wykresie dla kolejno zwiększanej wysokości napełnienia, a następnie opróżnienia (rys.75). Wykresy dla napełniania silosu otrzymane ze wskazań tensometru poziomego i pionowego zgadzają się bardzo dobrze z wykresem obliczonym według Reimbert (rys.76). Opróżnianie nie powoduje, w tym przypadku, zwiększenia parcia poziomego działającego na ścianki i można to przypisać zastosowaniu przewodu odciążającego. Widoczna na rys.75 bardzo duża histereza układu pomiarowego świadczy o istotnych wadach przyjętego sposobu wyznaczenia parć ośrodków sypkich



Rys. 74



Rys. 75

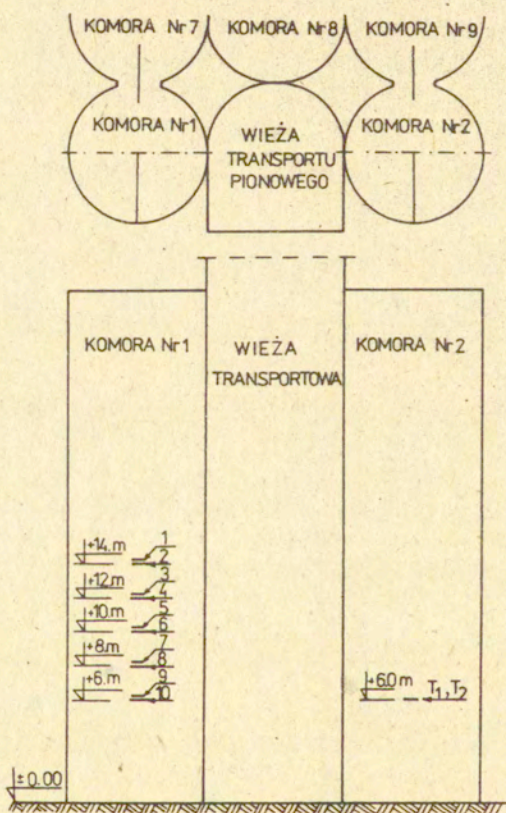


- Krzywa odpowiadająca tensometrowi poziomemu
- Krzywa odpowiadająca tensometrowi pionowemu
- Krzywa teoretyczna

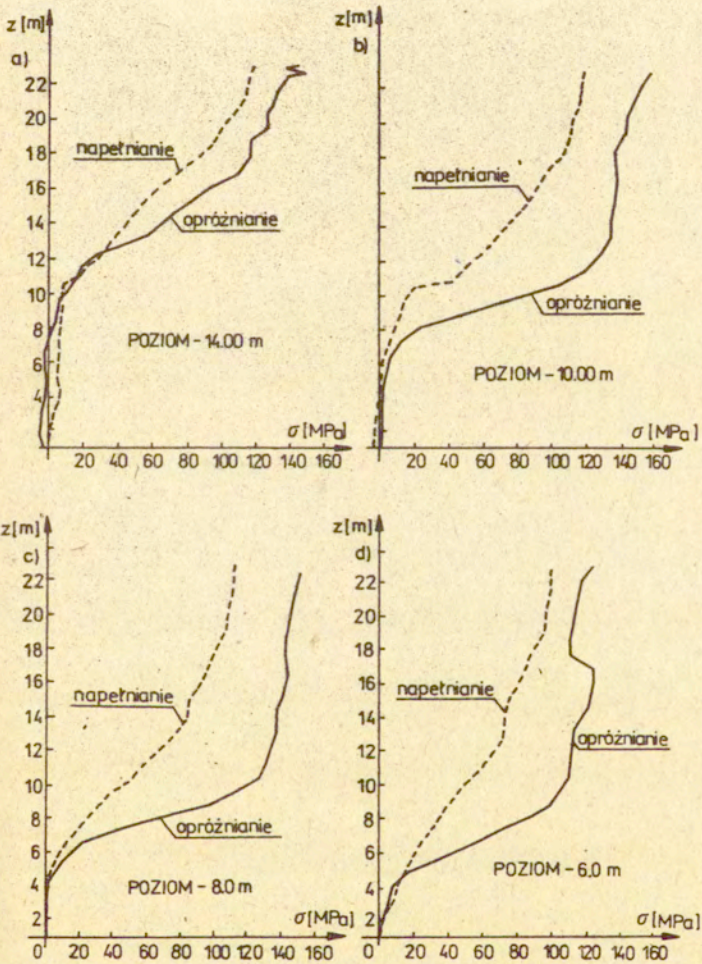
Rys. 76

działających na ściany silosu.

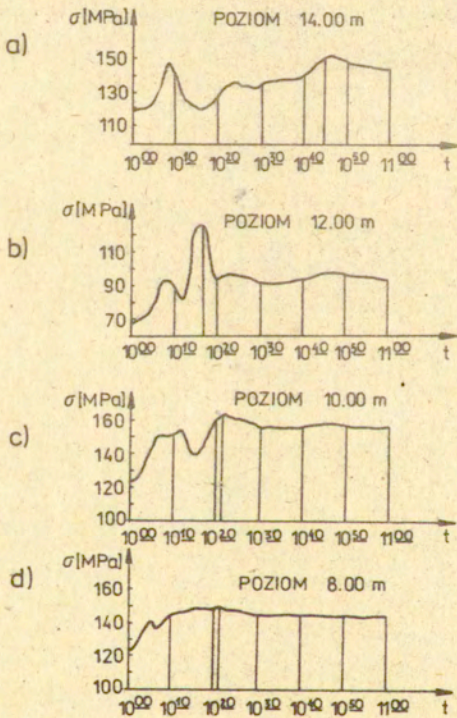
Badania parć w silosach żelbetowych wykonywane są czasami poprzez pomiar zmiany odkształceń zewnętrznej warstwy zbrojenia po uprzednim jego lokalnym odkryciu na różnych wysokościach. Badania tego typu przeprowadzono przede wszystkim do oceny wartości współczynnika parcia dynamicznego [53], Taki też był cel badań na dużych, wielokomorowych silosach, których wyniki przedstawiono w pracy [54]. Zbrojenie odkryto na pięciu różnych wysokościach zgodnie ze schematem pokazanym na rys.77. Na prętach o średnicy ϕ 10 i ϕ 14 mm naklejono po dwa tensometry elektrooporowe w kierunkach prostopadłych. Po włączeniu w układ mostkowy uzyskiwało się w ten sposób kompensację zmian temperatury. Dodatkowo dla sprawdzenia wpływu zmian temperatury naklejono dodatkowe tensometry na odkrytym pręcie zbrojeniowym sąsiedniego silosu, który był napełniony i wyłączony z eksploatacji. Zmiany wskazań tego tensometru mogły być wywołane tylko zmianami temperatury. W ten sposób można było dodatkowo kontrolować wpływ temperatury i ewentualnie skorygować wskazania tensometrów naklejonych na komorze nr 1. Badania zmian naprężeń w zbrojeniu przeprowadzono przy pełnym cyklu napełniania i opróżniania silosu jęczmieniem. Napełnianie trwało 25 godzin, a opróżnianie 28 godz. Wykresy zmiany naprężeń w zbrojeniu przedstawiono na rys.78. Rozpoczęcie opróżniania powoduje w tym przypadku wzrost naprężeń. Rejestrując zmiany naprężeń dla poszczególnych poziomów w czasie pierwszej godziny opróżniania (rys.79) widać, że maksymalne wartości naprężeń występują po pewnym czasie od momentu otwarcia otworu wysypowego. Stosunek największych wartości występujących na danym poziomie w trakcie opróżniania do naprężeń po napełnieniu silosu przyjmowano jako wartość współczynnika dynamicznego. Interpretacja wyników pomiarów przeprowadzonych w ten sposób jest jednak bardzo utrudniona. Rozkład naprężeń obwodowych po długości zbrojenia może być nierównomierny. Przyjmowanie, jak to zrobiono w pracy przy porównaniu wyników pomiarów z wynikami obliczeń według Janssena, że parcie materiału sypkiego w silosie jest przenoszone wyłącznie przez zbrojenie, jest daleko idącym uproszczeniem. Pomiary są obarczone błędem wynikającym z dużej histerezy wskazań, jak to było widoczne w badaniach poprzednio opisanych. Wzrost obciążeń po rozpoczęciu opróżniania uniemożliwia ocenę histerezy wskazań



Rys. 77



Rys. 78



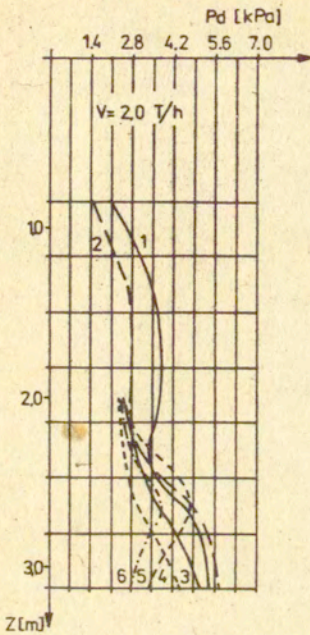
Rys. 79

tensometrów.

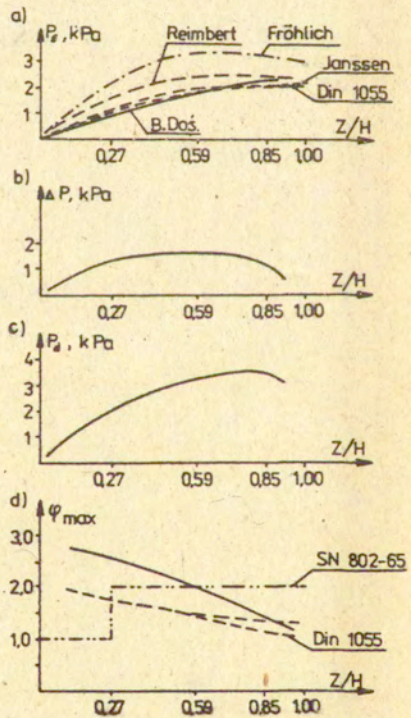
Sposób pomiaru dynamicznych współczynników stosowany w pracy [55] jest bardzo podobny. Badania wykonywano na modelu żelbetowym o średnicy 1,25 m i wysokości 3,78 m napełnianym pszenicą. Na zewnętrznej średnicy komory założone były ze wstępnym naciskiem obręcze pomiarowe na różnej wysokości, na które naklejono tensometry elektrooporowe rozstawione co 120° na obwodzie silosu. Mierzono wskazania tensometrów w trakcie napełniania i po otworzeniu niesymetrycznego otworu wysypowego. Obliczone, na podstawie pomiarów, rozkłady parcia dynamicznego przedstawiono na rys.80. Linia (1) dotyczy tworzącej ściany silosu po stronie otworu wysypowego i leżącej w płaszczyźnie przechodzącej przez oś komory i otworu. Linia (2) dotyczy przeciwległej tworzącej. Linie pozostałe przedstawiają wykresy dla pośrednich tworzących. Charakter otrzymanych wykresów jest inny od przedstawionego poprzednio i otrzymanego na podstawie pomiaru bezpośredniego. Duży rozrzut punktów doświadczalnych potwierdza, że pomiary wykonywane w ten sposób obarczone są błędami, które zresztą są trudne do oszacowania.

Pomiar parcia statycznego wykonywano również [56] na specjalnym modelu segmentowym z żelbetu. Komora składała się z sześciu łupin spiętych stalowymi drutami na różnej wysokości. Na drutach tych naklejone były tensometry elektrooporowe.

Model silosu w badaniach parcia zboża [57] wykonany był ze szkła organicznego. Na jego zewnętrznej powierzchni naklejono 16 tensometrów elektrooporowych. Otrzymane wyniki przedstawiono (rys.81) w postaci wykresu parcia statycznego jako funkcji wysokości silosu mierzonej od jego górnej krawędzi, nadwyżki parcia Δp i rozkładu parcia dynamicznego p_d w momencie opróżniania oraz współczynnika dynamicznego. Wykresy doświadczalne zaznaczono linią ciągłą. Przedstawiono również wykresy obliczeniowe parcia statycznego i zalecane wartości współczynnika dynamicznego według normy radzieckiej i niemieckiej. We wnioskach stwierdzono, zgodnie z otrzymanymi wynikami, że zmiany współczynnika dynamicznego są bardziej zbliżone do wartości zalecanych przez normę DIN niż normę SN. Natomiast w badaniach prezentowanych w pracy [54] sformułowano wniosek, że wartości doświadczalnych współczynników są bardziej zbliżone do zaleceń normy radzieckiej. W obu przypadkach wnioski



Rys. 80

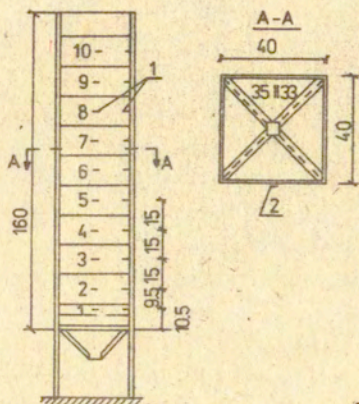


Rys. 81

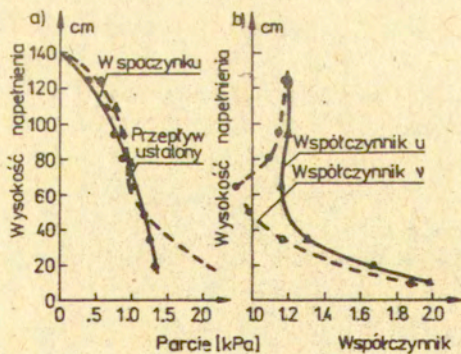
były zgodne z otrzymanymi rezultatami, ale uwzględniając nawet różnice między tymi eksperymentami należy przypuszczać, że przyjęte metody pomiarowe mogą w istotny sposób wpływać na wyniki.

Pomiary rozkładu parcia na ściankę silosu przedstawione w pracy [58] należą również do metody pośredniej. Model silosu o kwadratowej komorze o boku 40 cm i wysokości 160 cm wykonano ze szkła organicznego. Jedna ze ścian pocięta była na paski o szerokości 15 cm, na które naklejono po dwa tensometry elektrooporowe (rys.82). Każda z płytek jest czujnikiem parcia, a jej odkształcenia będą proporcjonalne do średniego ciśnienia, przy pominięciu sił tarcia jakie działają na liniach styku sąsiednich płytek. Błąd pomiaru wywołany tarciami na tych krawędziach nie był jednak szacowany. Program doświadczeń obejmował analizę wpływu sposobu napełniania silosu i wpływu przewodu odciążającego na rozkłady parcia poziomego. Pomijając wyniki tej analizy przytoczymy typowy wykres dla silosu napełnionego od góry rzepakiem (rys.83). Linia ciągłą zaznaczono na rys.83 a) parcie statyczne, linią przerywaną parcie przy opróżnianiu silosu w fazie przepływu ustalonego. Wartości współczynnika przeciążenia μ zdefiniowanego jako stosunek największej wartości parcia podczas opróżniania do wartości parcia statycznego zaznaczono linią ciągłą na rys.83 b. Linia przerywaną zaznaczono wartości współczynnika ν zdefiniowanego jako stosunek parcia przy przepływie ustalonym do parcia statycznego. Porównując charakter wykresów parcia i współczynników dynamicznych z rys.83 z wykresami poprzednio przedstawianymi, szczególnie w zakresie małych wartości współrzędnej wysokości, możemy przypuszczać, że prezentowany sposób pomiaru jest obarczony dużym błędem. Wykres parcia statycznego (rys.84) jest zgodny z wykresami obliczeniowymi według Janssena i Reimbert przy założeniu ciężaru objętościowego $\gamma=650 \text{ kg/cm}^3$, kąta tarcia wewnętrznego $\phi=34^{\circ}34'$ i współczynnika tarcia rzepaku o szkło organiczne $f=0,26$. Ta dobra zgodność widoczna na rys.84 nie jest wystarczającym potwierdzeniem poprawności stosowanej techniki pomiarowej.

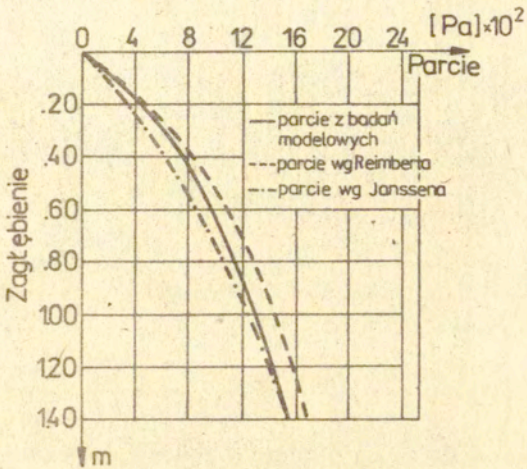
Zasada pomiaru zastosowana w pracy [59] była podobna do poprzednio opisaney. Mierzono rozkłady parcia na ścianę klinowego leja w kształcie ostrosłupa. Przekrój leja w górnej części był kwadratem o boku 100 cm. Nacisk na ścianę mierzono za pomocą płyt



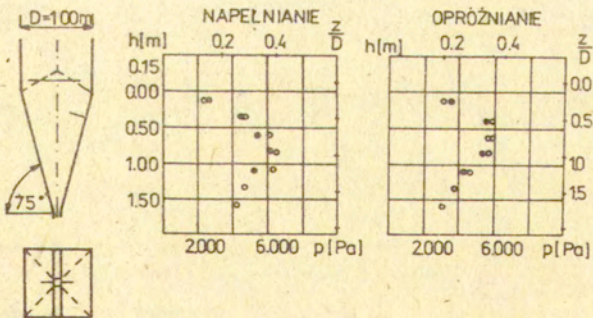
Rys. 82



Rys. 83



Rys. 84



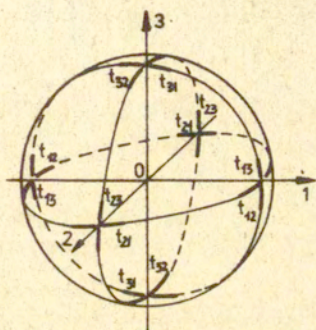
Rys. 85

o wysokości 50 cm i długości 100 cm zamocowanych do konstrukcji wsporczej za pomocą listew, na których przyklejono tensometry oporowe. Był to więc nacisk wypadkowy z całej szerokości leja i wysokości 50 cm. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.85 dla fazy napelniania i opróżniania. Kółeczkami zaznaczono punkty otrzymane dla leja w kształcie klina, ciemne punkty dotyczą leja w kształcie ostrosłupa. Charakter wykresów parcia dynamicznego jest zgodny z wynikami innych prac, ale w przypadku pomiarów parcia statycznego wykres ma wyraźnie zmniejszające się wartości w dolnej części.

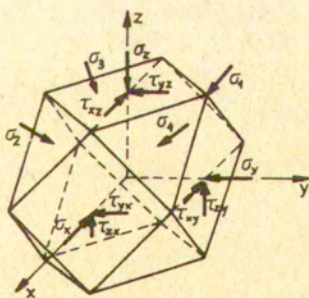
4. Pomiar naprężeń w ośrodku sypkim

Czujniki opisane w punkcie 2 umożliwiają pomiar naprężeń kontaktowych między ośrodkiem sypkim i ścianą silosu. Realizacja tego zadania nie jest łatwa szczególnie, gdy dążymy do bezpośredniego pomiaru składowej normalnej i stycznej parcia działającego na roboczą powierzchnię czujnika. Podejmowane próby wyznaczania rozkładu parcia na ścianę silosu poprzez pomiar jej odkształceń są zwykle trudne do interpretacji, charakteryzują się dużymi błędami i nie zawsze dostajemy wyniki jakościowo zgodne z innymi pracami. Trzeci sposób pomiaru parcia w silosach polega na umieszczeniu sondy o specjalnej konstrukcji wewnątrz ośrodka sypkiego. Mierzymy wówczas nie rozkład parcia na ścianę silosu, ale rozkład naprężeń w ośrodku znajdującym się w silosie. Badania takie mogą być wykorzystane do weryfikacji rozwiązań teoretycznych jak i do wyznaczenia rozkładu parcia działającego na ścianki silosu poprzez ekstrapolację rozkładu naprężeń w ośrodku. Metody taką stosowane od dawna w mechanice gruntów nie znalazły jeszcze szerszego zastosowania w silosach, ale podejmowane próby warte są przedstawienia.

Sondy do pomiaru wartości i kierunku naprężeń w gruntach były stosowane wielokrotnie. Jedno z rozwiązań konstrukcyjnych przedstawione jest na rys.86 [60]. Wewnątrz czaszy kulistej o promieniu 130 mm wykonanej z blachy stalowej o grubości 3 mm naklejono 24 tensometry elektrooporowe w sposób pokazany na rys.86. Powłoka kulista składa się z dwóch półkul zaciśniętych w pierścieniu. Przyrząd ten stosowano do pomiaru ciśnień w gruncie w



Rys. 86



Rys. 87

zakresie od 0 do 2 MPa z dokładnością do 10 kPa. Wyznaczenie naprężeń w gruncie przy pomocy tej sondy odbywa się na podstawie znanego jej położenia wewnątrz gruntu i wskazań czujników tensometrycznych.

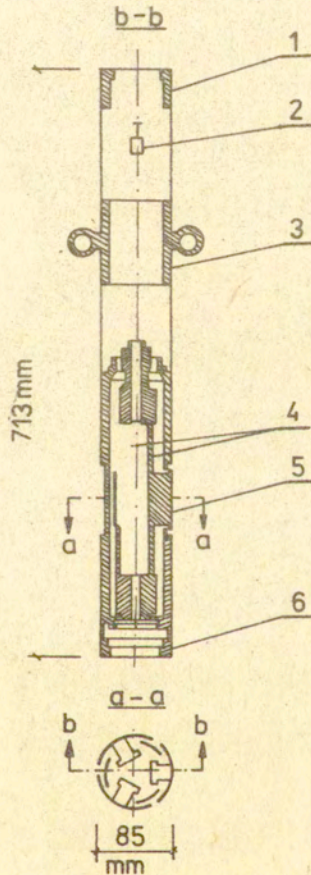
Sonda pokazana na rys.87 [61] wykonana jest w postaci bryły czternastościennej z umieszczonymi w każdej ścianie czujnikami magnetosprężystymi. Wartości wszystkich sześciu składowych naprężenia można wyznaczyć na podstawie pomiarów z trzech ścian trójkątnych i czterech kwadratowych. Odczyty wskazań na ścianach pozostałych służą do kontroli.

Znacznie łatwiejsze w użyciu są sondy do pomiaru tylko jednej składowej naprężenia w określonym kierunku. Przykładem takiego rozwiązania była sonda przedstawiona na rys.67 [18] do pomiaru parcia zboża w silosach.

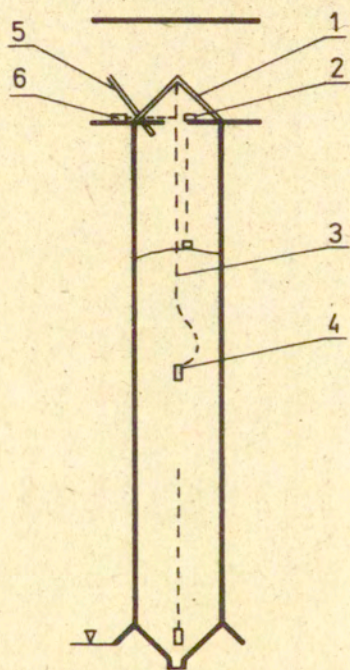
Schemat przetwornika przeznaczonego do pomiaru parcia poziomego w osrodku sypkim w silosach przedstawiono na rys.88 [62]. Czujnik ten (4) zawieszony był na różnych wysokościach w silosie na linie z przewodami elektrycznymi (3) (rys.89). Wskazania czujnika przesyłane były do stanowiska pomiarowego (6). Do kontroli wysokości napelnienia stosowano specjalny czujnik (2). Pokazany na rys.88 czujnik zbudowano w postaci rurki o średnicy 85 mm i wysokości 713 mm. Elementy pomiarowe umieszczone w przekroju a-a miały naklejone tensometry elektrooporowe. W górnej części wewnątrz czujnika wbudowano pochyłomierz (2), który służył do kontroli pionowego kierunku usytuowania czujnika wewnątrz osrodka sypkiego.

Schematyczny rysunek sondy do pomiaru składowych naprężenia wewnątrz osrodka sypkiego w silosie prezentowany jest również w pracach [33,36,38]. Są to jednak bardzo skąpe informacje bez prezentacji otrzymanych wyników pomiarów.

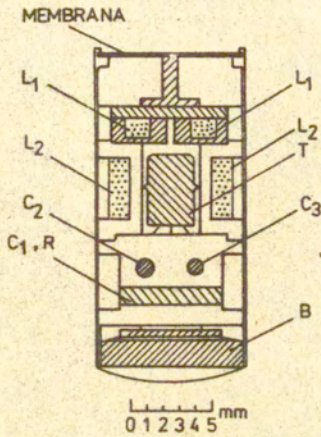
Interesujące rozwiązanie pomiaru parcia osrodka sypkiego w silosie przedstawiono w pracy [63]. Wykorzystano tam mały czujnik radiowy o średnicy 1 cm i wysokości 2 cm, pokazany na rys.90. Konstrukcja tego czujnika powstała dla zastosowań medycznych i jest obecnie produktem handlowym. Czujnik jest połączeniem przetwornika ciśnienia i nadajnika radiowego. W rozwiązaniu pokazanym na rys.90 ciśnienie działające na membranę powoduje przemieszczenie ferrytowego dysku. Indukcyjność obwodu zależy od



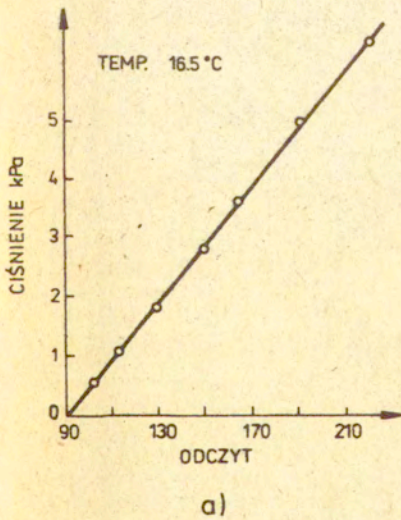
Rys. 88



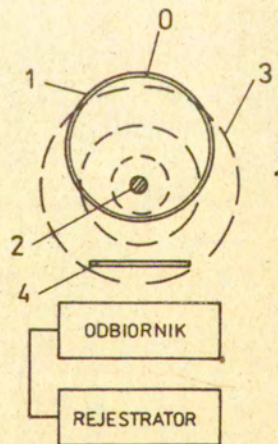
Rys. 89



Rys. 90



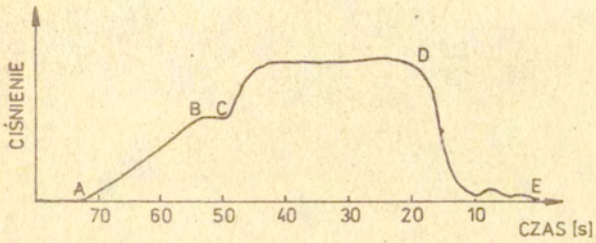
a)



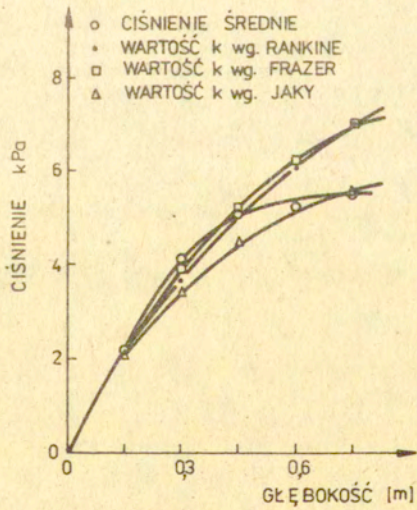
b)

Rys. 91

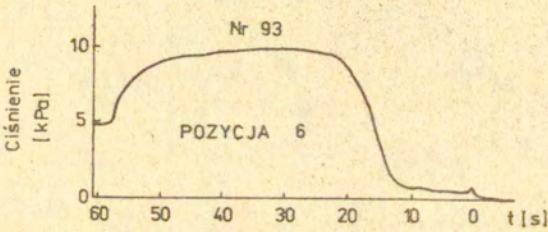
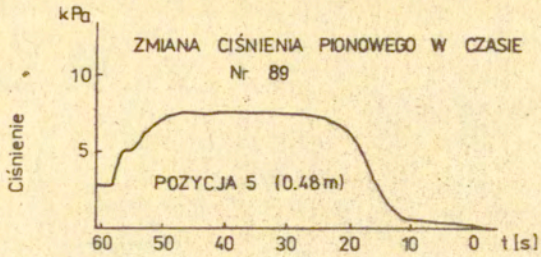
szczeliny powietrznej między dyskiem a cewką L_1 . Zmiana indukcyjności powoduje zmianę częstotliwości sygnałów nadawanych przez czujnik. Zmiany te rejestrowane są przez odbiornik. Zakres częstotliwości czujnika jest 300+500 kHz, całkowite ugięcie membrany powoduje zmianę częstotliwości o 20 kHz. Pozostałe elementy czujnika to cewka (L_2), kondensatory (c_1, c_2, c_3), opornik (R), tranzystor (T) i bateria (B). Wykres kalibracji czujnika przedstawiono na rys.91 a. Zestaw aparatury stanowiska pomiarowego składa się z modelu silosu (1), umieszczonego wewnątrz czujnika (2) emitującego fale elektromagnetyczne (3), które odbierane są przez antenę (4) i odbiornik oraz zapisywane na rejestratorze (rys.91 b). Przebieg doświadczenia był następujący: silos zasypywano piaskiem do pewnej wysokości, na której umieszczano w określonym miejscu czujnik, a następnie napełniano silos. Rejestrowano wartość ciśnienia wskazywanego w czasie napełniania oraz od chwili rozpoczęcia opróżniania aż do momentu gdy czujnik wyleci z silosu. Typowy wykres wskazań czujnika zarejestrowany w trakcie doświadczenia pokazano na rys.92. Napełnianie rozpoczyna się w punkcie A, od którego obserwujemy wzrost ciśnienia do całkowitego napełnienia silosu. Opróżnianie rozpoczyna się w punkcie C wywołując wzrost ciśnienia. Poczynając od punktu D, w którym czujnik wchodzi do stożkowego leja ciśnienie gwałtownie spada. W punkcie E czujnik wylatuje z silosu. Umieszczając czujnik na różnej wysokości można określić zależność ciśnienia pionowego od głębokości. Zmierzony w ten sposób rozkład parcia statycznego porównano z wynikami obliczeń według Janssena przyjmując wartości K (stosunek poziomego do pionowego ciśnienia) proponowane przez różnych autorów (rys.93). Wartości zmierzone zaznaczono kółeczkami. Zarejestrowane przebiegi parcia pionowego dla różnego położenia początkowego czujnika przedstawiono na rysunkach 94 i 95. Czujniki umieszczone były na głębokości 483 mm w osi silosu (pozycja 6) i w pozycji sąsiedniej blisko osi (rys.94). Zmiany ciśnienia czujnika w pozycji początkowej w odległości 19 mm od ściany silosu na głębokości 457 mm pokazano na rys. 95. Powtarzalność zmian wskazań czujnika w dwóch przebiegach doświadczalnych jest dobra. Zmiany rejestrowane wzdłuż osi silosu nie wykazują fluktuacji widocznych na wykresach rejestrowanych blisko ściany. Wartości rejestrowane w leju stożkowym są mniejsze



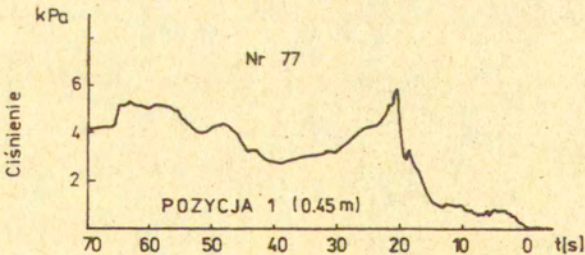
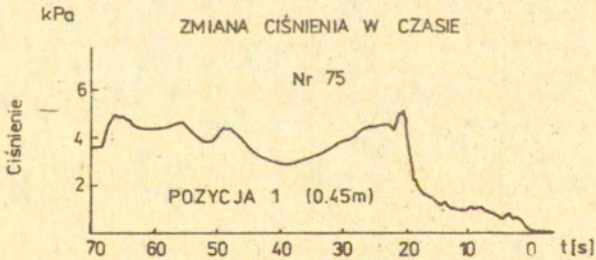
Rys. 92



Rys. 93



Rys. 94



Rys. 95

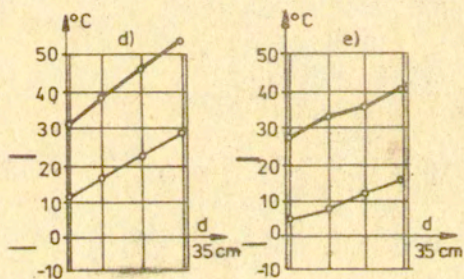
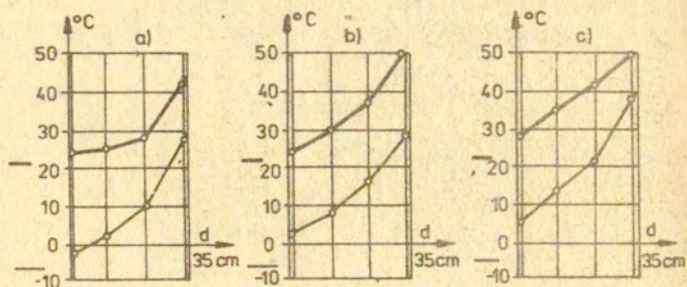
wzdłuż osi od wartości przy ścianie.

Wprawdzie prezentowane w pracy [63] wyniki są rezultatami wstępnych pomiarów i nie wystarczają do wyznaczenia rozkładów naprężeń w składowanym w silosie osrodku sypkim wzdłuż jego przekroju czy wysokości, ale jest to niewątpliwie kierunek badań bardzo obiecujący zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia.

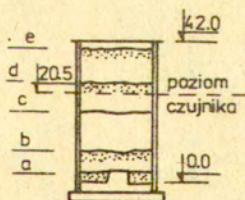
5. Wnioski

Wyniki badań doświadczalnych parcia osrodków sypkich na ściane silosu przedstawione w poprzednich punktach otrzymywane były różnymi metodami, w różnych warunkach i dla różnych materiałów magazynowanych w silosie. Ich bezpośrednie porównanie nie jest możliwe. Dodatkowe trudności wynikają jeszcze z odmiennej interpretacji wyników pomiarów stosowanej w różnych pracach. W części z nich rozkład parcia dynamicznego utożsamia się z największymi wartościami występującymi na danej wysokości w trakcie całego procesu opróżniania silosu, w innych przyjmuje się chwilowy rozkład w momencie rozpoczęcia opróżniania. W przypadku stosowania ciągłej rejestracji wskazań w poszczególnych punktach pomiarowych obserwuje się wyraźne oscylacje parcia na ściany silosu przy jego opróżnianiu. Część autorów przyjmuje wówczas średnie wartości wskazań, część natomiast wartości największe. Dyskretna rejestracja wskazań w określonych odstępach czasu daje, dla danego punktu pomiarowego, losowe wartości parcia w przedziale podwójnej amplitudy występującej pulsacji. Wyniki pomiarów będą więc zależne nie tylko od sposobu interpretacji, ale również od sposobu ich rejestracji.

Istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki pomiarów jest zmiana temperatury w trakcie badań. Pomijając zmiany temperatury otoczenia musimy uwzględnić wzrost temperatury w trakcie napełniania i opróżniania silosu. Zmiany te zależą od rodzaju materiału sypkiego, rodzaju silosu i jego parametrów eksploatacyjnych. Wyniki pomiarów rozkładu temperatury po grubości żelbetowego silosu (o pojemności 7300 m³) na cement przedstawiono na rys.96 [64] dla pięciu różnych wysokości. Linia gruba



— luty 1981
 — sierpień 1979



Rys. 96

zaznaczono zmiany temperatury rejestrowane przy napełnianiu silosu w okresie letnim, linią cienką w okresie zimowym. Największe różnice temperatur po grubości ściany wynoszą 30 K w lecie i 42 K w zimie. Są to wartości, które mogą wpływać na wyniki pomiarów. W przypadku opróżniania silosu nastąpi jeszcze wzrost temperatury wywołany tarcieniem przemieszczającego się osrodka o ściany silosu. Urządzenia do pomiaru parcia działającego na ścianę powinny zapewniać kompensację zmian temperatury. W przeciwnym przypadku błędy mogą być bardzo duże ze względu na wymaganą czułość pomiarów. Jest to warunek istotny, ale nie we wszystkich badaniach uwzględniany.

Badania parcia osrodków sypkich na ściany silosu przeprowadza się na istniejących obiektach rzeczywistych lub na modelach silosów. Wyniki tych dwóch rodzajów pomiarów są nieporównywalne. Wprawdzie możemy zbudować geometrycznie podobny model silosu rzeczywistego w określonej skali, ale ze względu na złożoną, nieliniową, zależną od czasu charakterystykę osrodków sypkich nie jest możliwe dobranie ich odpowiedników modelowych spełniających prawa podobieństwa modelowego. Ponieważ zarówno badania na modelach silosów jak i badania w skali naturalnej mają swoje wady i zalety, uważa się więc, że wyniki tych dwóch rodzajów badań wzajemnie się uzupełniają [65]. Badania na modelach silosów są tańsze, precyzyjniejsze, bo wykonywane w warunkach laboratoryjnych, umożliwiają ocenę wpływu poszczególnych parametrów procesu napełniania i opróżniania, których zmiana nie zawsze jest możliwa na obiektach rzeczywistych, umożliwiają również ocenę wpływu parametrów konstrukcyjnych silosu. Możliwe są również jednoczesne badania różnymi metodami pomiarowymi i porównanie ich wyników. Można połączyć np. obserwacje kinematyki przepływu osrodka z pomiarem rozkładu nacisków normalnych. Wadą badań na modelach silosów są wspomniane już zasadnicze trudności odniesienia wyników otrzymanych na modelach na obiekty rzeczywiste oraz trudności modelowania warunków odpowiadających tym obiektom. Badania na obiektach w skali naturalnej mogą być bezpośrednio wykorzystane do oceny obciążeń całej konstrukcji, umożliwiają weryfikację założeń przyjętych w obliczeniach, wykonywane są w warunkach eksploatacyjnych, a więc otrzymany obraz obciążeń ścian silosu odnosi się do tych warunków. Wady związane są z wysokimi

kosztami, trudnościami instalacji urządzeń pomiarowych czy jednoczesnym działaniu wielu ubocznych czynników wpływających na otrzymywane rezultaty.

Wszystkie wymienione wyżej czynniki wpływają na rezultaty doświadczalnych badań parcia ośrodków sypkich na ściany silosu. Zasadniczą rolę odgrywa zastosowany sposób pomiaru. Opisane w poprzednich punktach metody stosowane w różnych pracach podzielono na trzy grupy: bezpośrednie i pośrednie pomiary naprężeń kontaktowych i pomiary naprężeń wewnątrz ośrodka sypkiego. Żadna ze stosowanych dotychczas metod nie zyskała powszechnej akceptacji w takim sensie jak to ma miejsce np. w dziedzinie pomiaru odkształceń przy pomocy tensometrów elektrooporowych. Pomiary parć działających na ścianki silosów związane są więc z poszukiwaniem nowych metod badawczych lepszych od metod już stosowanych. Stąd też tak duża różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń pomiarowych opisanych w literaturze, z których wiele stosowano wyłącznie w badaniach o charakterze sprawdzającym. Postęp w dziedzinie metod pomiarowych tego typu związany jest zresztą z rozwojem techniki doświadczalnej i wiele z rozwiązań starszych ma obecnie jedynie znaczenie historyczne. W pomiarach naprężeń kontaktowych metodami bezpośrednimi stosowanie czujników hydraulicznych i pneumatycznych należy już do przeszłości. Zostały wyparte przez czujniki elektryczne. Wybór zasady działania takiego czujnika jest uzależniony, w wielu przypadkach od posiadanego wyposażenia elektronicznego i tradycji danego laboratorium. Biorąc natomiast pod uwagę takie czynniki jak koszt wykonania czujnika, możliwość jego miniaturyzacji, kompensację zmian temperatury i wymagana aparaturę elektroniczną należy uznać, że zastosowanie tensometrii elektrooporowej do budowy czujników parć ma przewagę nad innymi rozwiązaniami. Podkreślany w wielu pracach zarzut, że wskazania takich czujników zależą od oporów styków przy ich przelączaniu stracił swoją aktualność wraz z rozwojem aparatury tensometrycznej. Ważną zaletą czujników tensometrycznych jest możliwość jednoczesnego pomiaru naprężeń normalnych i stycznych, a jeden ze stosowanych sposobów pokazano na rys.72.

Podstawowa wada stosowania czujników do pomiaru parć związana jest z możliwością wprowadzenia zakłóceń przepływu ośrodka sypkiego (tworzenie się lokalnych sklepień), oraz możliwością

blokowania membrany czujnika przez drobiny materiału przenikającego w szczelinę między czujnikiem i gniazdem w ścianie silosu. Wada ta dotyczy wszystkich czujników bez względu na sposób pomiaru odkształceń membrany, natomiast konstrukcja czujnika musi uwzględnić związane z tym warunki.

Pomiary pośrednie stosowano głównie do wyznaczenia wartości współczynnika dynamicznego obciążeń silosu. Są to metody tańsze i łatwiejsze do wykonania zarówno w warunkach polowych jak i laboratoryjnych. Wyznaczenie parć materiału sypkiego na ścianę silosu na podstawie pomiarów odkształceń jego elementów wymaga przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej całej konstrukcji. Poważne i trudne do oszacowania błędy pomiarowe tego typu metod związane są z polem naprężeń resztkowych (montażowych, spawalniczych itp.) i ich redystrybucją pod wpływem zmiennych obciążeń działających na ścianki silosu. Pośrednie pomiary mogą jedynie stanowić podstawę szacowania obciążeń działających na silos. Uzupełnienie natomiast wyników pomiarów odkształceń konstrukcji silosu wynikami obliczeń wytrzymałościowych przeprowadzonych metodą elementów skończonych mogło by stanowić podstawę weryfikacji przyjętych założeń i uproszczeń przy obliczaniu parć ośrodka sypkiego na ściany silosu.

Pomiary naprężeń w ośrodku sypkim znajdującym się w silosie przy pomocy specjalnych sond są trudne do wykonania. Z opisanych w poprzednich punktach kilku podejmowanych prób w różnych laboratoriach, jedynie doświadczenia przeprowadzone na Uniwersytecie w Delf [51] można uznać za udane i obiecujące. Zastosowanie typowego, wykonywanego przez specjalistyczną firmę, czujnika umożliwiło wprowadzić pomiary tylko naprężenia normalnego do płaszczyzny membrany wzdłuż kilku trajektorii ruchu cząstek ośrodka, ale jest to sposób umożliwiający pomiary rozkładu naprężeń w różnych kierunkach i dla różnych przekrojów. Wadą tego typu czujnika jest możliwość jego obrotu w trakcie przemieszczania się razem z przepływającym ośrodkiem sypkim. Wyznaczając w ten sposób rozkłady naprężeń w różnych przekrojach zmagazynowanego czy przepływającego ośrodka sypkiego uzyskujemy podstawę do weryfikacji rozwiązań teoretycznych i do określenia wartości naprężeń kontaktowych działających wzdłuż ściany silosu.

Literatura

1. H.A.Janssen; Versuche über Getreidedruck in Silozellen, Zeit.Ver.Deutsch.Ing. 39, 1045-1049, 1895
2. W.Nowacki, R.Dąbrowski; Silosy, metody obliczeń i konstrukcja, PWT, Warszawa 1953
3. M.Reimbert, A.Reimbert; Silosy, teoria i praktyka, Arkady, Warszawa 1959
4. A.Drescher; Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach, PWN, Warszawa-Poznań, 1983
5. M.Kaminski, M.Zubrzycki; Żelbetowe silosy na zboże, Badania i projektowanie, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 41/1985
6. S.G.Tachtamysev; Davlenie sypučich tel v silosach, Gosstrojizdat 1952
7. L.S.Chorošy, M.G.Rodinov, N.F.Krasičkova-Ternovska; Uslovija raboty sbornych silosov diametrom 12 m, Promyslennoe stroitelstvo, nr 1, 1971
8. V.S.Kim; O pročnosti elevatorov, Mukomolno-elevatornaja promyslennost, nr 3, 1963
9. K.Pieper, F.Wenzel; Druckverhältnisse in Silozellen, Berlin 1964
10. R.Collins; Determining pressures in cylindrical storage structures, Trans.Amer.Soc.of Agricultural Engineering 6, 1963
11. K.Takahasaki, H.Gamahara; Dynamic pressure of grain on silo walls, Industrial Report of the Research Laboratory of the Shfmizu Construction Company, Tokyo, April 1963
12. A.Mitzel, M.Kaminski, M.Zubrzycki; Wstępne badania kinematyki przepływu osrodka sypkiego w silosach za pomocą promieni rentgenowskich, XX Konf. Naukowa Komitetu Inżynierii PAN i Komitetu Nauki PZiTB, tom 2, Kraków-Krynica 1974
13. A.Niemierko, B.Obiegałka; O sposobach pomiaru składowych naprężeń w gruntach, Arch.Inż.Lądowej 13, 4, 1967
14. A.Borc, A.Kwasniewski, T.Lorenc, A.Deim; Opracowanie nowej konstrukcji czujnika do pomiaru naporu materiałów sypkich oraz temperatury, Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985

15. K.Peattie, R.Sparrow; The fundamental action of earth pressure cells, J.Mech.Phys.Solids 2, 141-145, 1954
16. D.Taylor; Pressure distribution theories, earth pressure cell investigation and pressure distribution data, U.S.Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss. 1947
17. G.E.Monfore; U.S.Dept.of Interior, Bureau of Reclam. (Res.and Geol.Div.) Struct., Res.Lab.Report No S.P.26
18. Z.Śniadkowski; Pomiary ciśnień wewnątrz osrodków sypkich i gruntowych, Inżynieria i budownictwo, 10, 398-401, 1972
19. D.S.Baranow; Wybor osnovnych parametrov gruntowych miesdos, CNISK, Wyd.14, Moskwa 1962
20. A.I.Goldbeck, E.B.Smith; An Apparature for Determining Soil Pressure, Proc.Am.Soc.Test.Mat., 309-319, 1916
21. P.Wikramaratna; A new earth pressure cell, Proc. 5th Int.Conf. on Soil Mechanics and Found.Engng.,Dunod, Paris, 2, 509-512, 1961
22. A.Borczy, S.Kobiela, A.Tomkiewicz; Czujnik pneumatyczny do pomiaru parcia materiałów sypkich na konstrukcję. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 8-9, 339-340, 1975
23. P.W.Rowe, A.Briggs; Measurement on Model Struttet Sheet Pile Excavations, Proc.5th Int.Conf.on Soil Mech.and Foundation Engng.,Dunod, Paris 2, 473-478, 1961
24. W.I.Heijnen, J.P.H.Batteke; Traffic Tests Undertaken on Concrete Pavements at Schiphol Airport, Proc.5th Int.Conf. on Soil Mech. and Foundation Engng., Dunod, Paris, 2, 239-244,1961
25. F.Glötzl; Unmittelbare Spannungsmessung in Beton und Baugrund, Der Bauingenieur, 5, 190-195, 1958
26. M.Necasek; Measuring pressures on the walls of enamelled bins Vitkovice, 1st European Symposium on the Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids, Praha, September 3-7, 98-99, 1984
27. S.Kobiela, S.Barzycki, K.Nowak; Badania modelowe naporu cementu na ściany silosu, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 2/1, 1970
28. A.Mitzel, M.Kłapoć; Parcie statyczne i dynamiczne w silosach na zboże, 18-ta Konf. Naukowa, Krynica 1972

29. A.Mitzel, M.Rybiński, M.Zubrzycki; Eksperymentalne wyznaczenie parcia dynamicznego w silosach na zboże, 19-ta Konf. Naukowa, Krynica, 1, 141-150, 1973
30. A.Mitzel, M.Kamiński, M.Zubrzycki; Parcie poziome zboża w silosach w skali naturalnej i modelowej, 20-ta Konf. Naukowa, Krynica, 2, 199-206, 1974
31. A.Mitzel, M.Rybiński, M.Zubrzycki; Influence of perforated pipes on horizontal pressure in grain silos, International Symposium on Silos, 3rd Working Session of the IASS Committee of Pipes and Tanks, Wrocław, June 25-28, 1973. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 14, 91-102, 1974
32. M.Kamińska, A.Mitzel, M.Zubrzycki; Metody i dokładność pomiaru naporu osrodka sypkiego w silosach, Inż. i Bud., 6, 227-229, 1980
33. A.Borc; Badania doświadczalne naporu materiałów sypkich w silosach, Silosy - badania, projektowanie, budowa, użytkowanie, Szklarska Poręba, 25-30, listopad 1985, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 44, 29-36, 1985
34. A.Borc, Z.Marcinkowski; Measuring stand and preliminary results of the cement pressure investigation in a silo in a natural scale, Proc. Int. Symp. on Silos, 3rd Working Session of the IASS Committee of Pipes and Tanks, Wrocław, June 25-28, 1973, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 14, 55-69, 1974
35. A.Borc, S.Kobiela, Z.Marcinkowski; Czujniki do pomiaru naporu materiałów sypkich, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2, 37-53, 1970
36. A.Borc, Z.Marcinkowski; Wyniki doświadczalnych badań naporu cementu w silosie w skali naturalnej, 21-sza Konf. Naukowa, Krynica, 3, 1-15, 1975
37. M.Rybiński; Statyczne i kinematyczne obciążenia den silosów o różnej smukłości komór, Silosy - badania, projektowanie, budowa, użytkowanie, Szklarska Poręba, 25-30, listopad 1985, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 44, 71-76, 1985

38. A.Borc, M.Maj, J.Suleja, A.Trochanowski; The dynamic flow of loose materials from a silo, Proc. Conf. on Reliable Flow of Particulate Solids, Bergen, Norway, 20-22 August 1985
39. M.Kamiński, Z.Marcinkowski, M.Zubrzycki; Obciążenie w silosach o małym pochyleniu ścian, Przegląd Budowlany, 1-2, 35-38, 1983
40. S.Kobiela; The experimental determination of the distribution of cement pressure on the walls of a pneumatically emptied silo, Int. Symp. on Silos, 3rd Working Session of the IASS Committee of Pipes and Tanks, Wrocław, June 25-28, 1973, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 14, 1974
41. A.Borc, M.Maj, J.Suleja; Wspomagany napowietrzaniem wpływ cementu z silosu, Silosy - badania, projektowanie, budowa, użytkowanie, Szklarska Poręba, 25-30 listopad 1985, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 44, 1985
42. A.Borc, M.Maj, J.Suleja; Doświadczalny napór cementu na ściany i dno silosu, Silosy - badania, projektowanie, budowa, użytkowanie, Szklarska Poręba, 25-30 listopad 1985, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 44, 1985
43. A.Borc, J.Kmita, J.Zawidzki; Doświadczalne badanie parcia materiału sypkiego podczas ustalonego wypływu z zasobnika klinowego, Arch. Inż. Ładowej, 24, 4, 591-603, 1978
44. K.Biernatowski; Rozkład naprężeń pionowych w piasku w świetle badań laboratoryjnych, II Sesja Naukowa Wydz. Bud. Ład. Pol. Wrocławskiej, 1, 233-244, PWN Wrocław, 1963
45. S.G.Redshaw; A sensitive Miniature Pressure Cell, J.Sci. Instruments, 31, 467-469, 1954
46. H.Y.Wong; Some design and performance considerations of diaphragm type pressure cells using strain gauges, Geotechnique, 24, 1, 93-99, 1974
47. W.Jędrzejewski; Dynamometry do pomiaru parcia gruntu, Inż. i Bud., 3, 122-125, 1967
48. M.Kamiński, M.Zubrzycki; Wpływ usytuowania otworu wysypowego w komorze silosu na napór poziomy zboża, Inż. i Bud., 3, 86-89, 1979

49. D.M.Walker, M.H.Blanchard; Pressures in experimental coal hoppers, *Chemic. Engng. Science*, 22, 1-17, 1967
50. B.Ponder; Ocena oporu ruchu strugi osrodka Coulomba-Mohra na podstawie rozwiazania pewnego typu zagadnienia brzegowego dla naprezenia, *Rozp. Inz.*, 27, 4, 595-611, 1979
51. G.Broersma; Classic approach to the analysis of pressures and shear stresses in circular, conical hopper, mounted with its axis of symmetry vertically, *Problems of the Pebble Bed and Granular Materials*, Proc. THTR Symposium, EURATOM, Julich 1968
52. G.Broersma; Behaviour of granular materials, The Technical Publishing Company, H.Stam Ltd., Culemborg, The Netherlands (w druku)
53. P.N.Platonow, V.G.Lebiedinskij, V.B.Fasman; Elevatory i sklady, *Kolos*, Moskwe 1971
54. A.Lapko, W.Stachurski; Badania wspolczynnikow dynamicznych dla zelbetowej komory silosu zbozowego, 28-ma Konf. Naukowa. Krynica II, 139-146, 1982
55. G.Banachowicz, M.Kaminski, A.Mitzel; Grain pressure on silo walls with assymmetric outflow, *Int. Symp. on Silos*, 3rd Working Session of the IASS Committee of Pipes and Tanks, Wroclaw, 25-28 June 1973, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wroclawskiej*, 14, 1974
56. A.Mitzel, M.Klapoc; Parcie statyczne i dynamiczne w silosach na zboze, 18-ta Konf. Naukowa, Krynica 1972
57. M.Kaminski, J.Szczesniak, M.Zubrzycki; Wyznaczenie parcia zboza w modelu silosu ze szkla organicznego, *Inz. i Bud.* 4, 173-174, 1975
58. A.Boruszak, R.Sygulski; Parcie materialow sypkich na sciany silosow, *Inz. i Bud.*, 10, 393-397, 1972
59. V.Motzkus; Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter, *Dissertation*, Braunschweig, 1974
60. Z.Wasiutyński, A.Brandt; Przyrządy do pomiaru odkształceń w betonie i w gruncie, III Konf. Wytrż. Mat., SIMP-WAT, Warszawa 1963
61. M.Ichihara, S.Takagi; Development of a Seven-Face Earth Pressure Gauge, *Proc. Fifth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dunod, Paris, 2, 435-438, 1961

62. H.Fröning, K.Kordina; Silodruckmessungen mit einer nenentwickelten Messsonde, Bautechnik, 7, 222-225, Berlin 1980
63. M.F.Handley, M.G.Perry; Measurements of Stresses in Flowing Granular Materials, Rheologica Acta, 4, 3, 225-235, 1965
64. A.Trochanowski; Obliczenia rozkładu temperatur w silosie na cement, Silosy - badania, projektowanie, budowa, użytkowanie, Szklarska Poręba, 25-30 listopad 1985, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 44, 1985
65. A.Mitzel; Designing, Bulding and Operation of Silos for Loose Materials, Int. Symp. on Silos and Tanks, Wrocław, 25-28 June 1973, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 14, 25-38, 1974.

Doświadczalne metody wyznaczania parć ośrodków sypkich w silosach

Streszczenie

W pracy omówiono metody pomiaru parcia bocznego osrodka znajdujacego się w silosie na jego ściany. Przedstawiono przegląd konstrukcji stosowanych czujników i omówiono uzyskiwane rezultaty. Przedstawiono warianty bezpośredniego pomiaru nacisków przy pomocy czujników różnego typu zamontowanych w ścianie silosu. Opisano metody pośredniej oceny rozkładu nacisków na ścianę silosu poprzez pomiar zmiany naprężeń w wybranych elementach konstrukcji silosu w trakcie jego napełniania i opróżniania. Omówiono również pomiary naprężeń działających w osrodku sypkim znajdującym się w silosie przy pomocy specjalnych sond umieszczonych wewnątrz tego osrodka.

Experimental Methods for Determining of Pressure of Granular Materials in Silos

Resume

Methods of measurement of a horizontal pressure of granular materials on a silo walls are described in the paper. A survey of a structure of applied pressure cells and description of obtained results are presented. Discuss of different methods of a direct measurement of a horizontal pressure using cells of different types mounted in silo wall is presented. Methods of an indirect estimation of the pressure distribution on silo wall based on measurement of stress changes in some elements of the silo structure during filled up and emptied of silo are discussed. In the paper it is also presented description of measurements of components of stress acting in granular materials which fill up silo using special cells located inside that granular materials.

Spis treści

	strona
1. Wstęp	3
2. Doświadczalne wyznaczanie parć ośrodków ziarnistych na ścianę silosu poprzez pomiar bezpośredni	10
2.1. Czujniki pneumatyczne	18
2.2. Czujniki hydrauliczne	26
2.3. Czujniki elektryczne	44
3. Pośredni pomiar parcia materiału sypkiego na ściany silosu	86
4. Pomiar naprężeń w ośrodku sypkim	98
5. Wnioski	107
Literatura	112
Streszczenia	118



56747