

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT BUDOWNICTWA

Raport Serii PRE nr

**WPLYW PARAMETRÓW
GEOMETRYCZNYCH URZĄDZEŃ
REDUKUJĄCYCH NA PRZEPIY
MATERIAŁU SYPKIEGO I ROZKŁAD
OBCIĄŻEŃ W SILOSACH**

Ryszard ANTONOWICZ

PRACA DOKTORSKA

Promotor: prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński

Słowa kluczowe: silos, urządzenie odciążające, rozkład naporu, obciążenia, przepływ, wydatek, automat komórkowy

Wrocław 2004 r.

Spis treści

1. Wstęp	1
2. Cel i zakres pracy	2
3. Przegląd literatury przedmiotowej	7
3.1. Idea zastosowania rurowych urządzeń odciążających w silosach na materiały sypkie	7
3.2. Wpływ urządzeń rozładowniczych i odciążających na wartości i rozkład naporu	9
3.3. Obciążenie elementów pograżonych w ośrodku sypkim	16
3.4. Badania doświadczalne i teoretyczne przepływów materiału sypkiego	29
3.5. Podsumowanie dotychczasowych badań silosów wyposażonych w urządzenia odciążające	60
4. Tezy pracy	62
5. Badania modelowe	63
5.1. Badania wstępne	63
5.2. Analiza geometrii obiektu i modelu	64
5.3. Model badawczy	66
5.4. Aparatura pomiarowa	67
5.4.1. Czujniki naporu	67
5.4.2. Tensometry elektrooporowe	69
5.4.3. Rejestratory sygnałów	69
5.4.4. Rejestracja obrazu przepływu	70
5.4.5. Pomiar wydatku	70
5.5. Określenie właściwości materiału sypkiego	70
5.6. Inne prace przygotowawcze	73
5.7. Analiza wymiarowa podobieństwa modelowego	74
5.8. Program badań	77
5.9. Wyniki badań modelowych	82
5.9.1. Obciążenia ścian i dna	82
5.9.2. Obraz przepływu	108
5.9.3. Obciążenia przewodów odciążających	112
5.9.4. Wydatek opróżniania	114
5.9.5. Inne wyniki	118
5.9.6. Wnioski	124
6. Weryfikacja badań modelowych na obiekcie w skali naturalnej	125
6.1. Opis obiektu	125
6.2. Opis przeprowadzonych badań	125
6.3. Wyniki badań	128
6.3.1. Napory działające na przewody odciążające	128
6.3.2. Inne wyniki	139
6.4. Wnioski	142

7. Porównanie wyników badań modelowych i w skali naturalnej	144
8. Symulacja numeryczna przepływu materiału sypkiego	146
8.1. Modele ciągłe a modele dyskretne	146
8.2. Klasyfikacja automatów komórkowych	146
8.3. Automat komórkowy z wdrożonymi cechami fizycznymi materiału sypkiego	147
8.4. Probabilistyczny automat komórkowy	149
8.5. Symulacje przepływu w silosie	150
8.6. Wnioski	157
9. Propozycje rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń odciążających	158
10. Zakończenie, kierunki dalszych badań i wnioski końcowe	161
Literatura	165
Spis rysunków	170
Spis tablic	176

1. Wstęp

Magazynowanie, transport i przetwarzanie materiałów sypkich pełnią kluczową rolę w wielu gałęziach przemysłu. W większości przypadków procesy te wykonywane są na wielką skalę, a zatem i koszty im towarzyszące są znaczne. Wszystkie zagadnienia związane z ogólnie pojętą technologią materiałów sypkich powinny być efektywne i niezawodne.

Istnieje dużo prac doświadczalnych i teoretycznych poświęconych silosom i mechanice ośrodka sypkiego. Zaobserwowano, zbadano i opisano wiele zjawisk towarzyszących przepływowi materiału sypkiego oraz interakcji zachodzących między ośrodkiem sypkim a konstrukcją.

Ciągłe dążenie do zredukowania kosztów i zwiększenia efektywności transportu, magazynowania i przetwarzania materiału, zaowocowało sporą liczbą skutecznych rozwiązań. Rozwiązania te pozwalają z jednej strony na redukcję obciążeń wywołanych poruszającym się materiałem sypkim, a z drugiej regulują i optymalizują przepływ w kierunku większych wydatków. Spośród tych ostatnich można wymienić np. wszelkiego rodzaju wstawki i przewody odciążające. O ile stwierdzono skuteczność działania niektórych rodzajów przewodów odciążających, to wyniki dotyczące obciążeń działających na elementy pograżone w materiale sypkim różnią się znacznie między sobą i dotyczą tylko jednego typu urządzeń. Istniejące zależności teoretyczne nie opisują zachodzących zjawisk w sposób zadowalający.

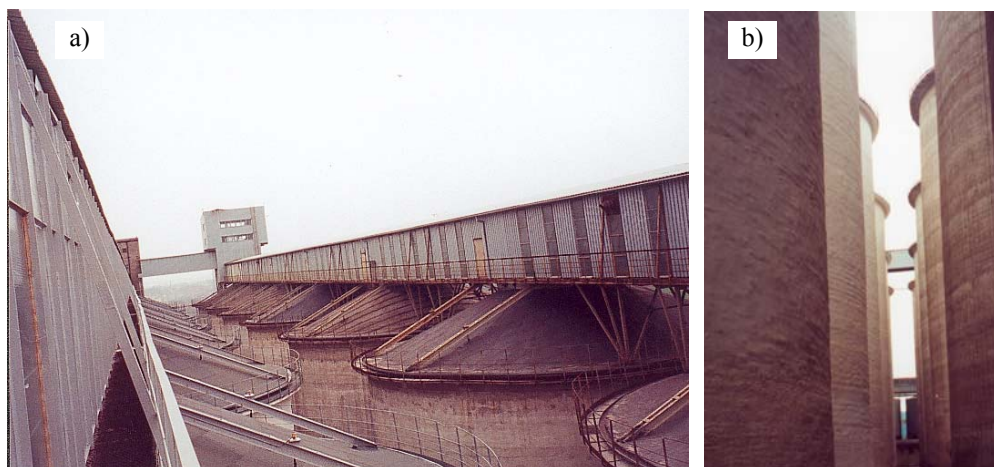
Praca zawiera badania krótkich urządzeń odciążających przeznaczonych do stosowania w silosach dużych średnic.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest określenie wpływu parametrów geometrycznych rurowych urządzeń odciążających na obraz przepływu materiału sypkiego i rozkład obciążeń w silosach.

Pierwowzorem analizowanej komory silosowej jest żelbetowa komora średnicy 19 m i wysokości powłoki walcowej 27 m. Baterie komór (rys. 2.1) liczące kilkanaście sztuk, wybudowano w wielu miejscach Polski w latach 60-tych i 70-tych ubiegłego wieku. Zasadniczo, baterie tego typu zlokalizowane są w zakładach tłuszczowych, a przeznaczeniem ich jest przechowywanie nasion oleistych, najczęściej rzepaku.

Oprócz baterii komór przeznaczonych do składowania ziarna, na system technologiczny elewatora składają się urządzenia do przyjmowania ziarna, maszynownia (wieża manipulacyjna) oraz urządzenia transportu poziomego (przenośniki taśmowe i łańcuchowe) i transportu pionowego (podnośniki czerpakowe). Ziarno doprowadzane jest do komory galerią nadkomorową. Przekrycie stanowi powłoka w postaci ściętego stożka, z trapezowych płyt żebrowych. Zasyp odbywa się przez dwa otwory w stropie. W stropie umieszczony jest również otwór do kontrolowania poziomu zasypu, a na powierzchni stożkowej zamontowane są liny, na których zawieszono są termometry do pomiaru temperatury wewnątrz materiału sypkiego.

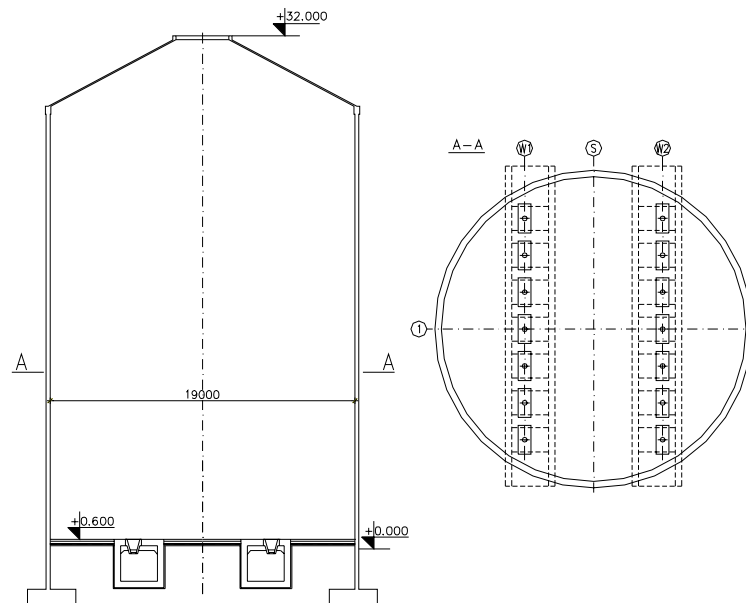


Rys. 2.1. Widok z góry (a) i z dołu (b) baterii komór średnicy 19m ustawionych w dwóch rzędach (widoczna galeria nadkomorowa i wieża manipulacyjna)

Ściany komory grubości 250 mm spoczywają na fundamencie pierścieniowym.. Komora posiada płaskie dno, wyposażone w 14 lejów wysypowych umieszczonych w dwóch rzędach (rys. 2.2). Średnica otworu wysypowego w leju wynosi 200 mm.

Pod każdym rzędem komór biegną dwa tunele żelbetowe, w których zainstalowane są przenośniki taśmowe do odbioru ziarna. Wysyp odbywa się przy włączonym taśmociągu i

otwartej klapie otworu wysypowego. W zależności od potrzeby, otwieranych jest kilka otworów w rzędzie lub w obydwu rzędach.



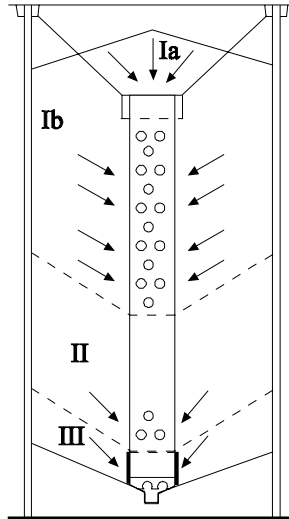
Rys. 2.2. Komora silosowa średnicy 19 m – przekrój pionowy i rzut dna

Rurowe urządzenia odciążające stosuje się w celu zmniejszenia naporów poziomych podczas opróżniania, kiedy to ich wartości zwiększają się znacznie na skutek ruchu materiału sypkiego.

Kilka czynników zdecydowało o zastosowaniu rurowych urządzeń odciążających do opróżniania opisanych komór. Komory te zostały zaprojektowane na mniejsze obciążenia niż to wynika z obecnego stanu wiedzy. Ponadto błędy wykonawstwa (imperfekcje geometryczne, zaniżona wytrzymałość betonu, brak odpowiedniej ilości wkładek zbrojeniowych), a także niewłaściwe użytkowanie oraz degradacja betonu i zbrojenia doprowadziły do tego, iż obecnie spora liczba komór nie jest zasypywana w pełnej wysokości lub zupełnie wyłączona z eksploatacji. W celu poprawienia ich stanu technicznego wykonano sporą liczbę remontów, obejmujących np. sprężenie obwodowe ścian, renowację płaszczy, uszczelnienia i wzmocnienia konstrukcji [23, 24]. Działania te miały na celu przywrócenie obiektów do pełnej eksploatacji lub uniknięcie poważniejszych awarii i były poprzedzone licznymi badaniami [6, 23].

Urządzenia odciążające mają najczęściej formę stalowych rur perforowanych, choć spotyka się też żelbetowe kolumny. W zależności od wymiarów komory silosu, zajmują całą jej wysokość (silosy smukłe) lub tylko 1/3 wysokości (silosy o średnicy 15-30 m). Zastosowanie urządzenia odciążającego pozwala zredukować przyrost naporu podczas opróżniania.

Wynalazcami opisanych urządzeń byli bracia Marcel i André Reimbert [56, 57], którzy przeprowadzili badania na silosach naturalnych rozmiarów. Na rysunku. 2.3 przedstawiono kolejne fazy (Ia – III) opróżniania silosu wyposażonego w przewód zajmujący całą wysokość komory, zawieszony na podatnych cięgnach.

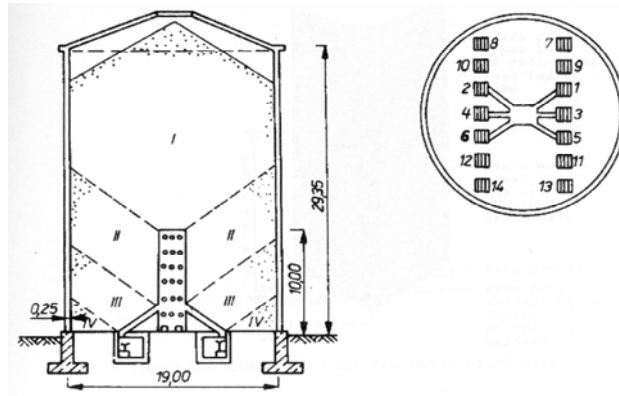


Rys. 2.3. Kolejne fazy opróżniania komory przy użyciu przewodu odciążającego

Kolejne badania wykonywane m.in. przez Kamińskiego i Zubrzyckiego [26-30], Oomsa i Robertsa [52, 53, 59], Łapko i Stachurskiego [71, 72] potwierdziły skuteczność dobrze zaprojektowanych urządzeń odciążających. Autorzy opracowań zwrócili również uwagę na występowanie awarii komór wyposażonych w źle zaprojektowane urządzenia.

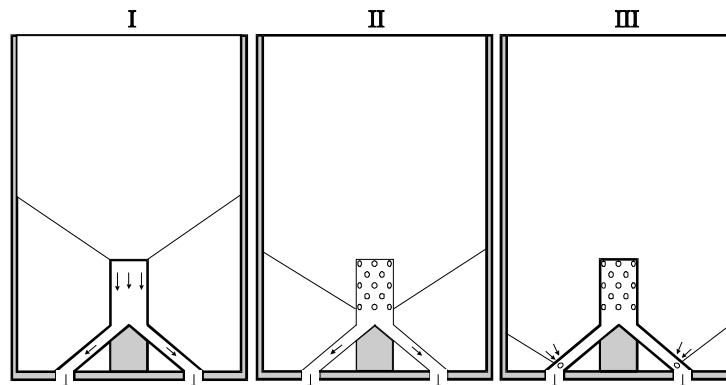
Badania obejmowały m.in. rozkład i wartość obciążeń działających na elementy pograżone w poruszającym się materiale sypkim i wpływ rodzaju i rozmieszczenia perforacji na skuteczność działania. W toku kolejnych eksperymentów zaprojektowano niewysokie przewody, tzw. króćce odciążające (rys. 2.4) z zastosowaniem do silosów dużych średnic (powyżej 15 m).

W rozwiązaniu tym główną część urządzenia stanowi pionowa rura średnicy ok. 2 m i wysokości rzędu 1/3 wysokości silosu, umieszczona centralnie w osi komory. Z boków rury głównej wyprowadzone są rury-rękawy odprowadzające materiał sypki do szeregu otworów wysypowych w płaskim dnie. Idea działania tego typu urządzenia zbliżona jest do wysokich przewodów. Myślowo można podzielić komorę na część wyższą, w której występuje przepływ centryczny w kierunku do urządzenia odciążającego i część niższą komory, gdzie znajduje się króciec. W celu zoptymalizowania przepływu i wydatków wykonuje się perforację kolejnych segmentów przewodów.



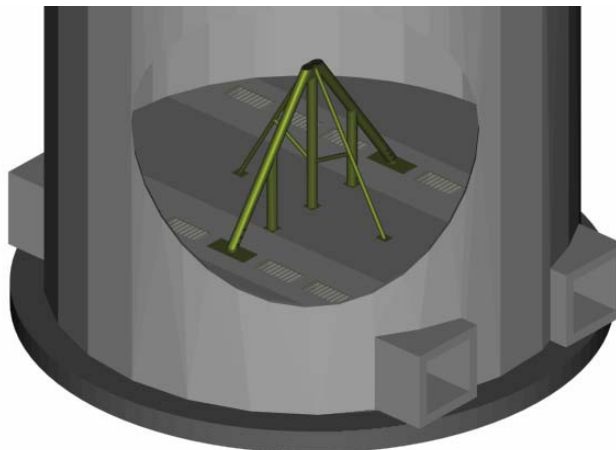
Rys. 2.4. Króciec odciążający w komorze średnicy 19 m i kolejność otwierania otworów wysypowych

Fazy przepływu w komorze wyposażonej w króciec zobrazowano na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Fazy przepływu w komorze wyposażonej w króciec odciążający

W trakcie eksploatacji elewatora wieża odciążająca przedstawiona na rysunku 2.4 okazała się niewygodna przy opróżnianiu stref martwych ze względu na zagęszczenie rękawów odprowadzających ziarno do otworów wysypowych i podpierających je dźwigarów. Przewidziano zatem zrealizowanie urządzenia odciążającego nowego typu (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Zmodyfikowane urządzenie odciążające do komory średnicy 19 m

W celu przeprowadzenia dokładnych badań wykonano model opisanej komory silosowej, przedstawiony na rysunku 2.7. Model opisano szczegółowo w podrozdziale 5.3 „Model badawczy”.



Rys. 2.7. Model do badań rurowych urządzeń odciążających

Cel pracy

Celem pracy jest określenie optymalnych parametrów geometrycznych niskich przewodów odciążających, możliwych do zastosowania w silosach dużych średnic, zapewniających odciążenie komory (redukcję przyrostu naporu dynamicznego podczas opróżniania) i pożądany wydatek opróżniania. Ponadto za cel pracy obrano wyznaczenie rozkładów i wartości obciążeń działających na przewody odciążające, pochodzących od materiału sypkiego, a także analizę obrazu przepływu w komorach z przewodami.

Zakres pracy

- krytyczny przegląd literatury dotyczącej przepływu materiału sypkiego i zastosowania rurowych urządzeń odciążających w silosach na materiały sypkie,
- wykonanie badań modelowych komory wyposażonej w rurowe urządzenia odciążające, w szczególności obserwacja przepływu, badania obciążeń samego urządzenia, ściany i dna, pomiaru wydatków podczas opróżniania,
- weryfikacja niektórych wyników badań na obiekcie w skali naturalnej,
- opracowanie wyników badań,
- opracowanie wytycznych do projektowania rurowych urządzeń odciążających.

3. Przegląd literatury przedmiotowej

3.1 Idea zastosowania rurowych urządzeń odciążających w silosach na materiały sypkie

Zgodnie z rozważaniami teoretycznymi w powłoce walcowej wolnostojącej komory silosowej, zależność pomiędzy równomiernie rozłożonym naporem poziomym a równoleżnikową siłą rozciągającą R przybiera postać:

$$R = 0,5 \cdot D \cdot p_h, \quad (3.1)$$

gdzie: D – średnica komory,

p_h – napór poziomy.

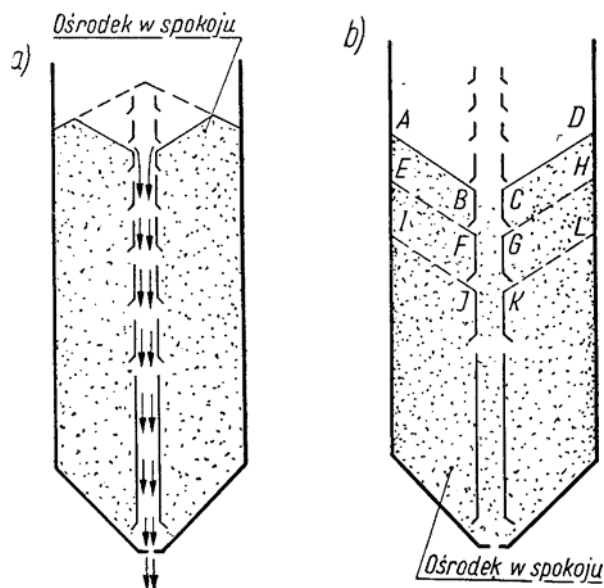
Wartość siły rozciągającej w przypadku komór żelbetowych decyduje o ilości przyjmowanego zbrojenia i grubości ścianki komory. Jak wykazywano w wielu pracach [5, 17, 22, 26, 30, 66] zasadniczy wpływ na wartości naporów poziomych ma rodzaj przepływu (masowy, lejowy, wewnętrzny), który z kolei zależy od kąta tarcia materiału sypkiego o ścianę i kąta nachylenia leja. Celowe są zatem działania zmierzające do zmniejszenia naporu poziomego w komorach silosowych. Do przepływu wewnętrznego można doprowadzić dzięki specjalnym rozwiązaniom konstrukcyjnym.

Ze znanych rozwiązań odciążających ściany należy wymienić stosowanie komór o ścianach podatnych [19, 32, 78], uźebrowanych, oraz opróżnianie przez komorę gwiazdkową, zastosowanie stożka zagęszczającego [30], a także wszelkiego rodzaju kolumny rozładowcze, zsuwnie i przewody perforowane [18, 24, 42, 43, 52, 64, 65, 66, 68, 73]. Szereg prac poświęcono zastosowaniu urządzeń do mieszania, aeracji, których przeznaczenie nie jest ściśle odciążające [15, 58, 68, 77], ale jak potwierdzają badania, m.in. [58, 67, 77] mają one również zmniejszający wpływ na wartości naporów, dynamiczne oddziaływanie materiału i zjawisko segregacji. Rodzajem urządzenia ściśle odciążającego jest przewód odciążający – stalowa bądź żelbetowa perforowana rura umieszczona w komorze.

Wynalazcami urządzeń odciążających byli bracia Marcel i André Reimbert, którzy pierwsze raporty z badań przeprowadzonych na silosach naturalnych rozmiarów opublikowali w grudniu 1953 r.

Ideę opróżniania komory za pomocą perforowanej rury przedstawia rysunek 3.1. Parcie ośrodka na ścianki jest funkcją m. in. średniego promienia hydraulicznego komory, w komorze więc jest ono znacznie większe niż w przewodzie, którego średni promień

hydrauliczny jest znacznie mniejszy. Wynika stąd, że w chwili otwarcia otworu wysypowego tylko ziarno wewnątrz przewodu jest wprowadzone w ruch, podczas gdy ziarno poza przewodem pozostaje w spoczynku.



Rys. 3.1 Idea opróżniania komory przez przewód perforowany Reimbertów [56, 57]

Gdy górny poziom ziarna obniży się do poziomu najwyżej położonych otworów bocznych przewodu, wówczas ziarna górnej warstwy przedostają się przez nie i wpadają do wnętrza rury kierując się w dół, ku otworowi wysypowemu. Tak, kolejnymi warstwami, od góry ku dołowi, wysypuje się cały materiał.

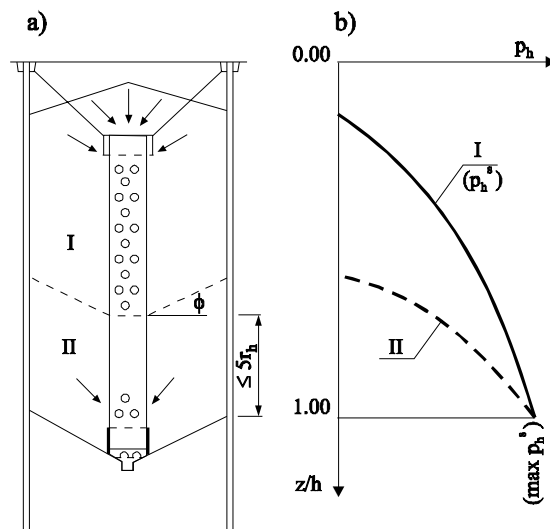
Odciążenie komory, będące skutkiem opróżniania przez przewód jest więc zmniejszeniem wartości przyrostu naporu poziomego. Zjawisko przyrostu naporu, mającego charakter dynamiczny lub quasistatyczny występuje w początkowej fazie opróżniania i było tematem wielu prac badawczych teoretycznych i doświadczalnych.

Przy dobrze zaprojektowanym urządzeniu cały materiał przepływa przez rury grawitacyjnie ku dołowi, gdzie znajduje się otwór wysypowy. Warstwy górne opróżniane są na początku, pozostała część materiału nie wsypuje się do rury, gdyż nie pozwala na to ruch materiału wewnątrz rury. Warstwy najniżej położone wysypują się na końcu. Należy zaznaczyć, że przewody odciażające można stosować tylko do komór z materiałami łatwo sypiącymi się, bez kohezji, np. w elewatorach zbożowych.

3.2 Wpływ urządzeń rozładowniczych i odciążających na wartości i rozkład naporu

Pozytywny wpływ zastosowania przewodów odciążających na napór w silosie potwierdzili Kamiński i Zubrzycki [25-30]. Badania przeprowadzili dla szerokiego zakresu przewodów. Podstawowy podział przewodów według ich klasyfikacji to rury podatnie zawieszane na stalowych ciężnach z dolnym końcem mającym możliwość przesuwu pionowego oraz rury sztywno zamocowane w dnie.

Rysunek 3.2 przedstawia perforowaną rurę zawieszoną podatnie (a) i jej wpływ na przepływ i wielkość naporu poziomego p_h (b). Przepływ odbywa się w dwóch fazach, najpierw dzięki otworom w górnej części wysypuje się górna partia materiału - I, a dopiero w dalszej kolejności wysypuje się materiał dolnych partii komory - II. Urządzenie redukuje całkowicie przyrost naporu ponadstatycznego.

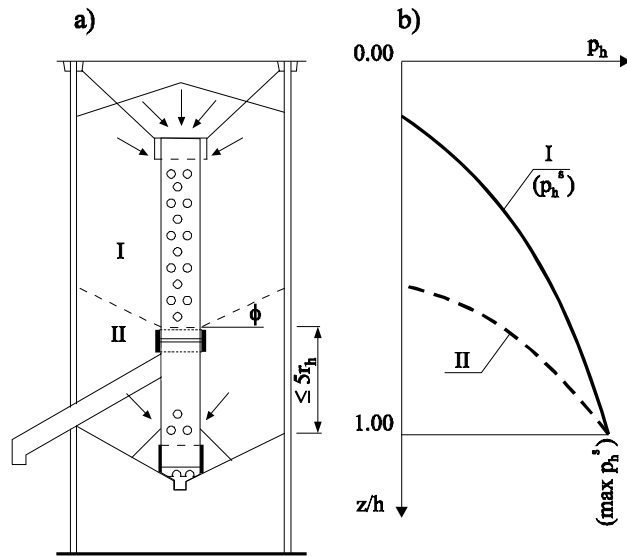


Rys. 3.2. Przewód zajmujący całą wysokość komory zastosowany w badaniach Kamińskiego i Zubrzyckiego [25-30]

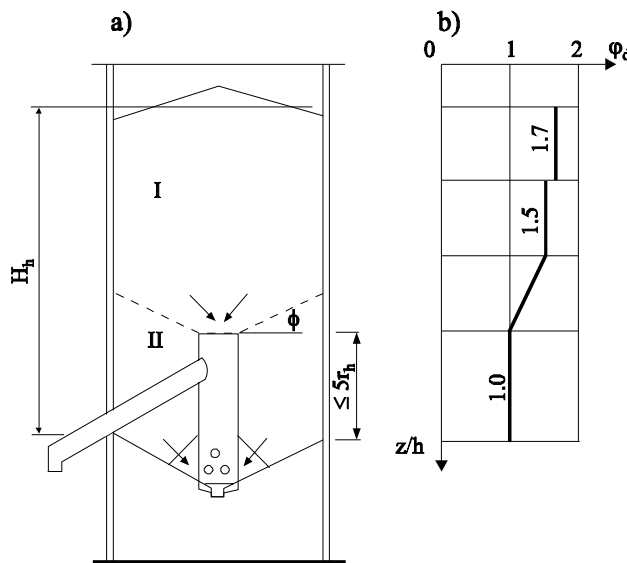
Inne rozwiązanie przewodu, umożliwiające boczne opróżnianie bezpośrednio na środki transportu kołowego przedstawia rysunek 3.3. Przewód w tej formie wykazuje podobną, wysoką skuteczność działania.

Na rysunku 3.4a przedstawiono kolejne, zalecane do bardziej krępych silosów ($H/D \leq 3,0$), rozwiązanie przewodu odciążającego, częściowo redukującego przyrost naporu przy opróżnianiu. Opróżnianie może być dokonywane przez otwór umieszczony centralnie lub przez boczny rękaw. W dolnej części komory uzyskuje się całkowitą redukcję przyrostu

naporu (rys. 3.4b). Ograniczeniem stosowania tego rozwiązania jest wysokość króćca, która powinna być mniejsza od $5r_h$, gdzie r_h – promień hydrauliczny komory.



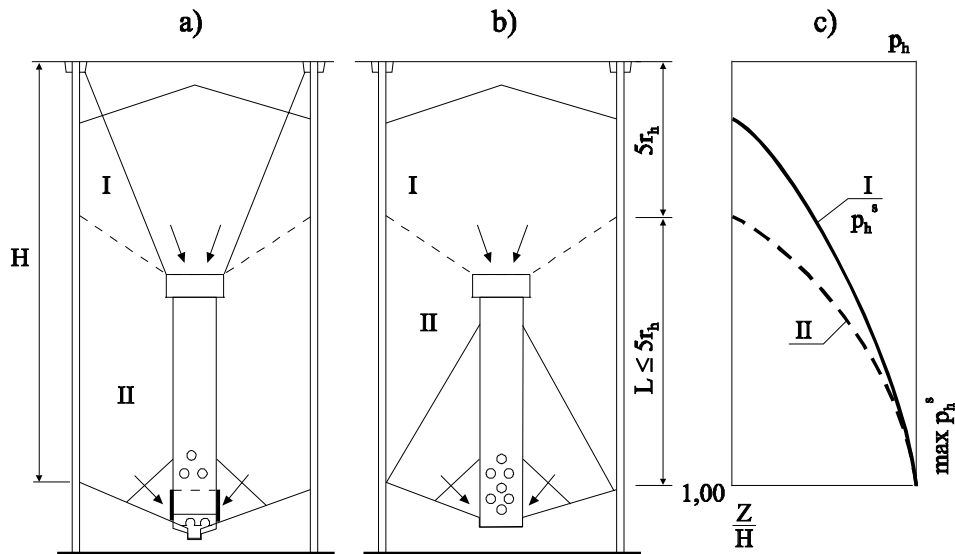
Rys. 3.3 Rura zajmująca pełną wysokość komory z bocznym ramieniem wysypowym [30]



Rys. 3.4 Króciec odciążający z ramieniem bocznym (a) i współczynniki dynamiczne (b) według badań Kamińskiego i Zubrzyckiego [26]

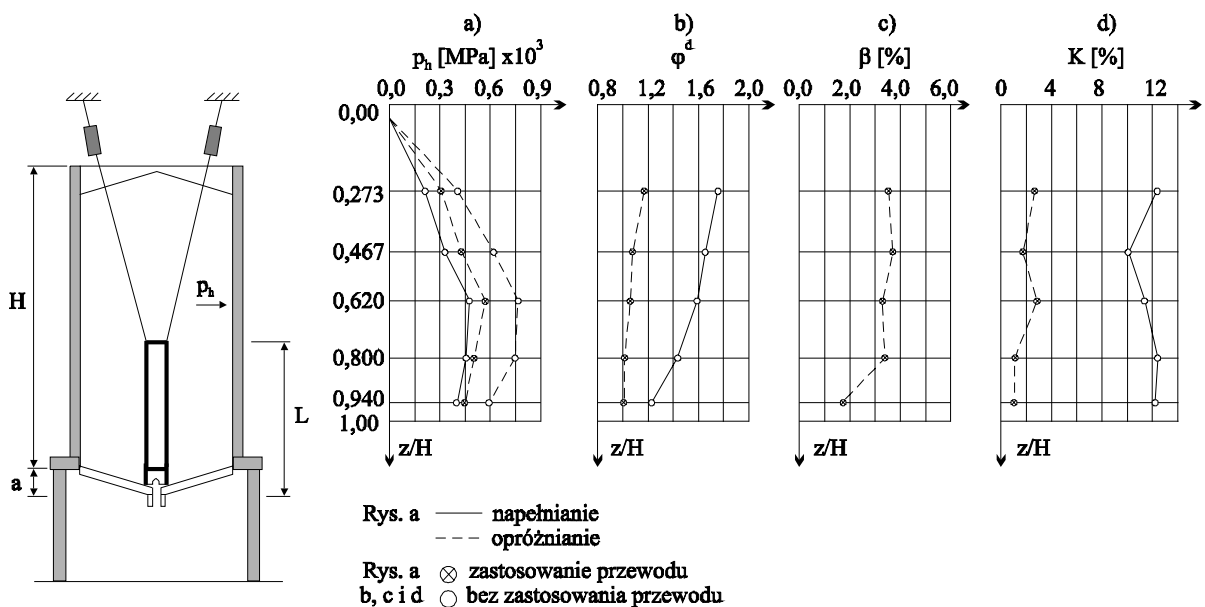
Inne, równie poprawnie działające urządzenie odciążające przedstawia rysunek 3.5. Zalecane do silosów, w których ($H \leq 10r_h$), wykonane z linami przytrzymującymi koniec rury (a) lub z odciągami (b), całkowicie redukuje przyrost naporu podczas opróżniania. Zasada działania jest podobna do przewodów opisanych wyżej. Górne partie materiału opróżniane są w pierwszej kolejności, przy nieruchomych partiach dolnych. Całkowity brak ruchu w dolnych częściach komory eliminuje przyrost naporu. Linia ciągłą na wykresie 3.5c oznaczono napór

poziomy podczas opróżniania. Wysypywanie się materiału ze stref oznaczonych II nie powoduje wzrostu naporu (linia przerywana) ponad napór towarzyszący opróżnianiu strefy I.



Rys. 3.5 Króciec odciążający do komór o proporcjach $H \leq 10r_h$

Szczegółowe wyniki badań króćca z rysunku 3.5 przedstawiono na rysunku 3.6. Wykres (a) przedstawia napór podczas napełniania oraz opróżniania, wykres (b) zawiera wartości współczynnika dynamicznego φ^d , będącego ilorazem największego naporu poziomego przy opróżnianiu i naporu występującego po napełnieniu. Wartości współczynnika procentowej redukcji naporu dynamicznego β zobrazowano na wykresie (c), zaś procentową nierównomierność współczynników dynamicznych na wykresie (d).



Rys. 3.6 Wyniki badań króćca odciążającego do komór o proporcjach $H \leq 10r_h$

Skuteczność takiego rozwiązania jest bardzo duża. Maksymalna osiągnięta wartość β wyniosła 34 %. Współczynnik nierównomierności rozkładu współczynnika dynamicznego wyniósł średnio $K = 1,2$ %, a w dolnych partiach komory $K = 0$ %. Stwierdzono przy tym brak pulsacji naporu.

Autorzy tych obszernych badań [25-30] opisali interesującą metodę określenia skuteczności działania przewodów. Otóż, w pobliżu otworów perforacyjnych zastosowali pewną ilość ziaren pomalowanych cienką warstwą farby. Okazało się, że ziarna te wypłynęły niemal w całości po ziarnach nie pomalowanych. Dowodzi to faktu, że cała objętość materiału, znajdująca się poniżej górnego poziomu rury, znajduje się w spoczynku, aż do momentu opróżnienia przewodu.

Autorzy określili kryteria, które powinny spełniać dobrze zaprojektowane przewody. Ich skuteczność zależy od:

a) ilorazu średnic przewodu i komory

$$\kappa = \frac{d_l}{D}, \quad (3.1)$$

b) stopnia perforacji poszczególnych segmentów przewodu

$$\Psi = \frac{\sum F_{oi}}{F_p}, \quad (3.2)$$

gdzie: Ψ_i – średni stopień perforacji i-tego segmentu,

$\sum F_{oi}$ – suma powierzchni otworów perforacyjnych na pobocznicy segmentu,

F_p – powierzchnia pobocznic segmentu,

c) ilorazu długości przewodu do wysokości komory i leja $L/(H+a)$,

d) rozmieszczenia otworów perforacyjnych,

e) kształtu otworów perforacyjnych,

f) wydatku opróżniania,

g) parametru Ω :

$$\Omega = \Psi_A \frac{d_l}{D} \left(\frac{d_l}{d} \right)^2, \quad (3.3)$$

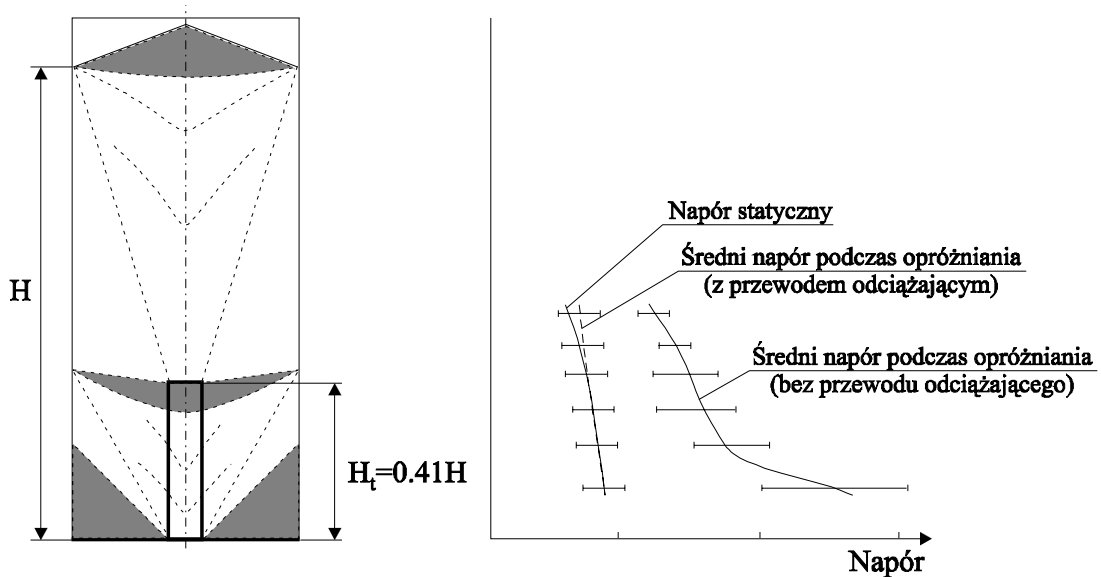
gdzie: Ψ_A – średni stopień perforacji górnego segmentu,

d – średnica otworu wylotowego w leju.

Człon $\Psi_A \frac{d_l}{D}$ określa zdolność doprowadzenia ośrodka sypkiego przez otwory perforacyjne do wnętrza przewodu odciążającego. Człon $(d_l/d)^2$ określa zdolność

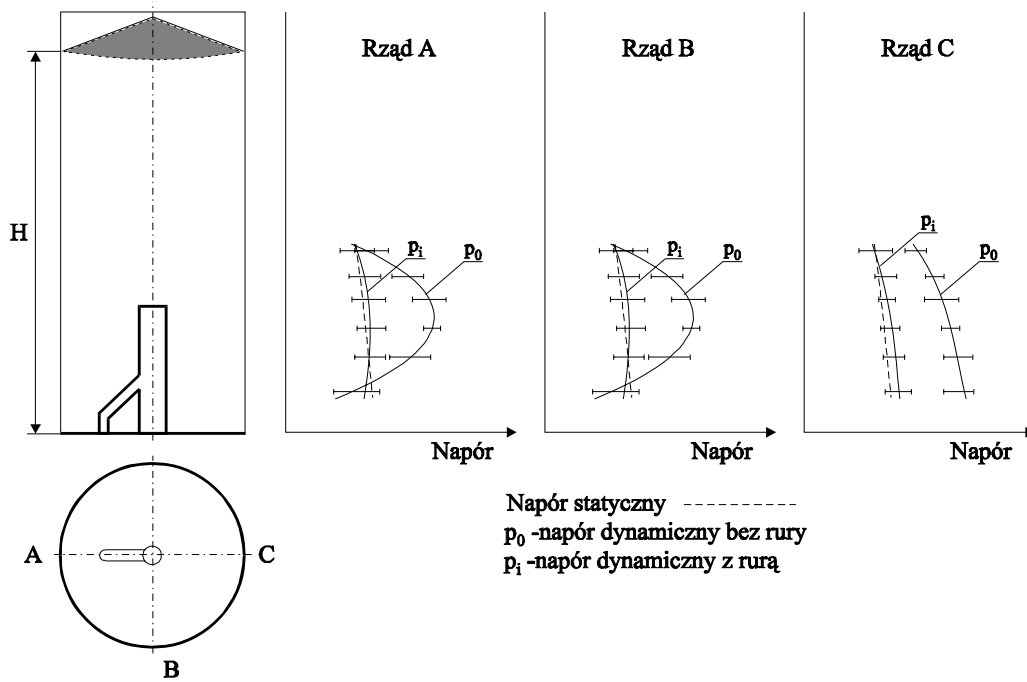
magazynowania przewodu. Parametr syntetyczny Ω zawierający średni stopień perforacji reguluje zmienność perforacji. Autorzy przyjęli, że intensywność perforacji powinna zmieniać się odpowiednio do zmian współczynnika dynamicznego przy tradycyjnym sposobie opróżniania.

Z badań przeprowadzonych przez Oomsa i Roberta [52, 53] wynika, że przez zastosowanie krótkiego przewodu odciążającego można zmniejszyć przyrost naporu podczas opróżniania. W badaniach tych zastosowano rurę bez perforacji. Wysokość modelu wynosiła 3,8 m, a średnica 1,2 m. Jako materiału użyto jęczmienia i pszenicy o kącie tarcia wewnętrznego pomiędzy 30° - 35° . Zastosowano czujniki do pomiaru naporu zamontowane przy ścianach. W przypadku opróżniania centrycznego okazało się, że prawie nie występuje przyrost naporu w przypadku zastosowania rury odciążającej (rys. 3.7).



Rys. 3.7 Wyniki badań przepływu i naporów według Oomsa i Roberta w komorze wyposażonej w króciec odciążający [52, 53]

Przy zastosowaniu ramienia bocznego do opróżniania, odprowadzającego materiał w dowolne miejsce z głównej rury, również nie zaobserwowano znacznego przyrostu naporu, a rozkład naporu wokół ścian komory był również symetryczny (rys. 3.8).



Rys. 3.8 Wyniki badań naporów Oomsa i Roberta w komorze wyposażonej w króciec odciążający z ramieniem bocznym

Oprócz badań naporu autorzy podali zależności geometryczne, które powinien spełniać króciec odciążający, zapewniające poprawne jego działanie.

Według ich zaleceń, wysokość króćca powinna być nie mniejsza niż:

$$h_{t \min} = H - \frac{(D/2)}{\tan \Theta}, \quad (3.4)$$

i nie większa niż:

$$h_{t \max} = \frac{(D/2)}{\tan \Theta} - (D/2) \tan \beta, \quad (3.5)$$

gdzie: H – wysokość komory silosu,

D – średnica komory silosu,

β – kąt nachylenia górnej powierzchni materiału sypkiego względem płaszczyzny poziomej,

Θ – kąt nachylenia stref martwych względem płaszczyzny pionowej, który można wyznaczyć z zależności Jenikego:

$$\Theta = 40e^{-\left(\frac{\delta-20}{6+\delta/6S}\right)}, \quad (3.6)$$

lub według McLean'a [42, 43]:

$$\Theta = 25e^{-\left(\frac{\delta-30}{25}\right)}, \quad (3.7)$$

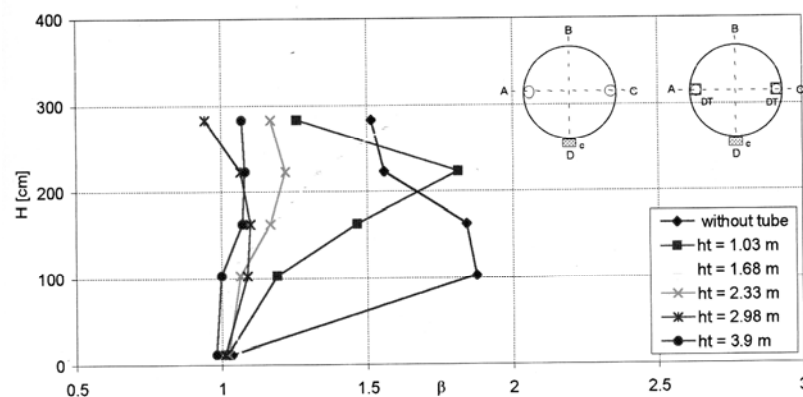
albo według Hazara i Basura [52]:

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tan \delta + \sqrt{\tan \delta \left(\frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan \delta + \tan \varphi} \right)}} \right], \quad (3.8)$$

gdzie: δ – efektywny kąt tarcia wewnętrznego materiału sypkiego,

φ – kąt tarcia materiału sypkiego o ścianę komory.

Shalouf [70] poczynił badania kanałów rozładowczych umocowanych do ścian silosu. Badany silos, stosowany również przez Klimka [32] miał wysokość 4,0 m i średnicę 1,5 m. Posiadał stalowe płaskie dno i ściany z prefabrykatów żelbetowych. Kanały rozładowcze w formie drewnianych korytek o przekroju 16x16 cm z perforacją pionową lub poziomą umieszczano wewnątrz komory na ścianach. Dzięki czujnikom zamontowanym w ścianach i dnie możliwy był pomiar naporu normalnego i stycznego. Materiałem użytym do badań był jęczmień o średniej wielkości ziarna 5 mm i ciężarze objętościowym $\gamma = 8,5 \text{ kN/m}^3$ i kącie stoku naturalnego $\phi = 28^\circ$. Autor badał wpływ zastosowania przewodów rozładowczych na rozkład i wartość naporów na ściany, w porównaniu do opróżniania bez rynien rozładowczych. Stosował jedną lub dwie rynny w różnych położeniach i z różnymi wymiarami perforacji. Wyniki podał przy pomocy współczynnika β , wyrażonego jako iloraz poziomego naporu dynamicznego przy opróżnianiu do poziomego naporu statycznego po napełnieniu. Rozkład współczynnika β w rzędzie D dla dwóch rynien umieszczonych nad otworami wysypowymi w rzędach A i C przedstawia rysunek 3.9.



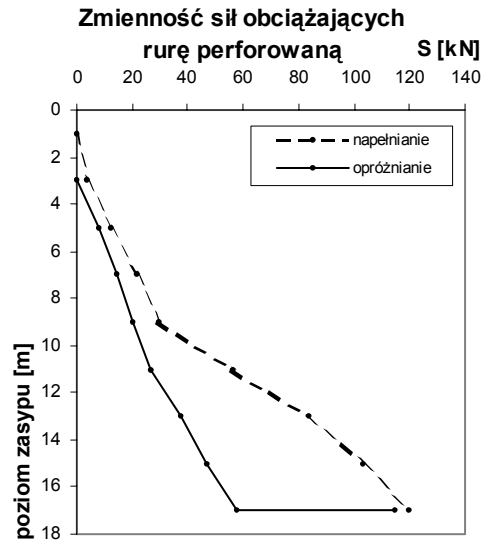
Rys. 3.9 Wartości współczynnika dynamicznego β według badań Shaloufa [70];
 h_i – wysokość rynny rozładowczej, krzywa ze znacznikami
w kształcie rombu odpowiada opróżnianiu bez rynny

Z badań wynika, że istnieje pewna optymalna szerokość rynny umieszczonej w punkcie B, z otworem pionowym szerokości 8 cm, która powoduje największą redukcję przyrostu naporu (31,4 % w rzędzie A i D). Odpowiedni współczynnik dynamiczny $\beta = 1,157$ i $\beta = 1,064$. Ustalono również optymalną wysokość rynny w rzędzie B wynoszącą 2,98m, która odpowiada wartości $\beta = 1,181$ w rzędzie A i $\beta = 1,029$ w rzędzie D. Zastosowanie dwóch rynien w miejsce jednej jest efektywniejsze a zastosowanie rynien z otworami poziomymi daje minimalną redukcję naporu przy opróżnianiu. Zarówno rynny z otworami pionowymi, jak i poziomymi, zmniejszają pulsacje towarzyszące opróżnianiu.

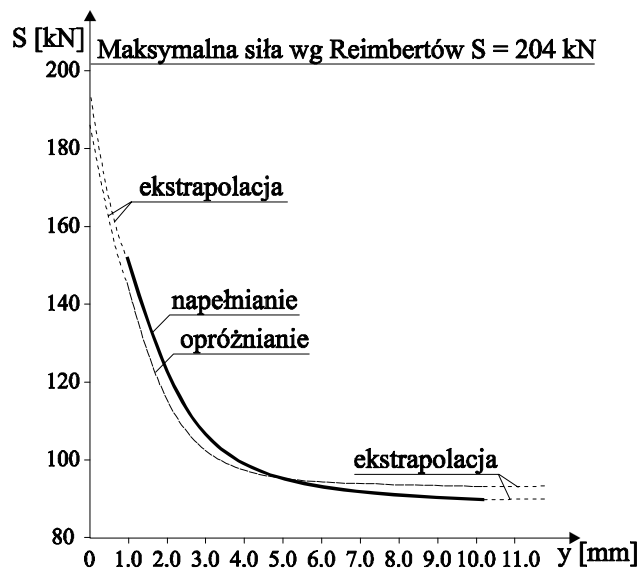
3.3 Obciążenie elementów pograżonych w ośrodku sytkim

Stachurski i Łapko [71, 72] poczynili badania przewodów odciążających zawieszonych podatnie do stropu komory silosowej. Badania przeprowadzono na obiekcie w skali naturalnej, określono zależności pomiędzy siłą obciążającą rurę perforowaną a jej przesunięciami podłużnymi. Przekrój poziomy komory był ośmiokątem wpisanym w okrąg o promieniu 6,0 m. Wysokość komory wynosiła 22,0 m, a swobodnie zwisający przewód miał średnicę 50 cm i długość 18,0 m. Połączenie ze stropem zrealizowano za pomocą dwóch prętów średnicy 20 mm, przyspawanych do rury i zakotwionych nakrętkami w belce stalowej o zmiennym rozstawie podpór. Połączenie takie pozwalało na zrealizowanie czterech różnych podatności zawiesia. Na prętach naklejono tensometry elektrooporowe do pomiaru odkształceń. Materiałem użytym do badań była pszenica o ciężarze objętościowym $\gamma = 8,10 \text{ kN/m}^3$ i kącie tarcia wewnętrznego $\phi_u = 29 \div 30^\circ$. Badania każdego wariantu zawieszenia wykonano dla pełnego cyklu napełniania i opróżniania. Wpływ sił podłużnych obciążających przewód, obliczonych na podstawie odkształceń tensometrów, w zależności od głębokości zasypu przedstawia rysunek 3.10.

Najbardziej charakterystycznym zjawiskiem występującym w każdym eksperymencie okazał się gwałtowny spadek siły obciążającej rurę w momencie otwarcia otworu wysypowego. Potwierdzeniem tezy o dużym wpływie ugięć belki mocującej (możliwości pionowego przemieszczenia górnego końca rury) na siły obciążające element w ośrodku sytkim jest rysunek 3.11.



Rys. 3.10 Siły obciążające przewód odciążający w funkcji poziomu zasypu [71, 72]



Rys. 3.11 Zmienność sił obciążających przewód w funkcji ugięcia zawiesia [71]

Wyniki sił obciążających przewody zostały porównane z teoretycznymi wzorami Reimbertów i firmy A/SN Foss Electric. Reimbertowie [56, 57] zalecają obliczanie siły S według wzoru:

$$S = \gamma \cdot r \cdot U \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{z^2}{z + A}, \quad (3.9)$$

przy czym:

$$A = \frac{d}{4\mu_1 \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\Phi_u}{2}\right)} - \frac{h}{3}, \quad (3.10)$$

gdzie: γ – ciężar objętościowy materiału sypkiego,

r – promień hydrauliczny komory,

U – obwód rury,

μ_1 – współczynnik tarcia materiału sypkiego o beton,

μ_2 – współczynnik tarcia materiału sypkiego o powierzchnię rury stalowej,

z – wysokość zasypu liczona od spodu rury,

D – średnica wewnętrzna komory,

Φ_u – kąt tarcia wewnętrznego materiału sypkiego,

h – wysokość górnego stożka powstającego przy napełnianiu.

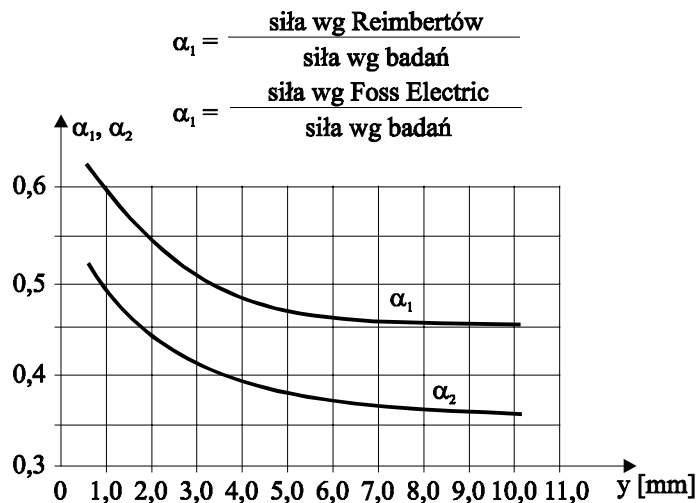
Według firmy A/SN Foss Electric, dla długości rury spełniającej warunek $L \leq D/2\mu_1k$, siłę S należy obliczać ze wzoru:

$$S = d \cdot \gamma \cdot \mu_2 \cdot \left[0,84 \cdot L^2 \cdot k + 0,27 \cdot \frac{D \cdot L}{\mu_1} \right], \quad (3.11)$$

natomiast dla $L > D/2\mu_1k$ obowiązuje wzór:

$$S = \frac{0,35 \cdot d \cdot \gamma \cdot \mu_2 \cdot D^2}{\mu_1 \cdot k} \cdot \left[\pi \cdot k \cdot \mu_1 \cdot \frac{L}{D} - 0,57 \right]. \quad (3.12)$$

Porównanie zmienności siły S z badań własnych z wartościami według Reimbertów i Foss Electric przedstawia rysunek 3.12.



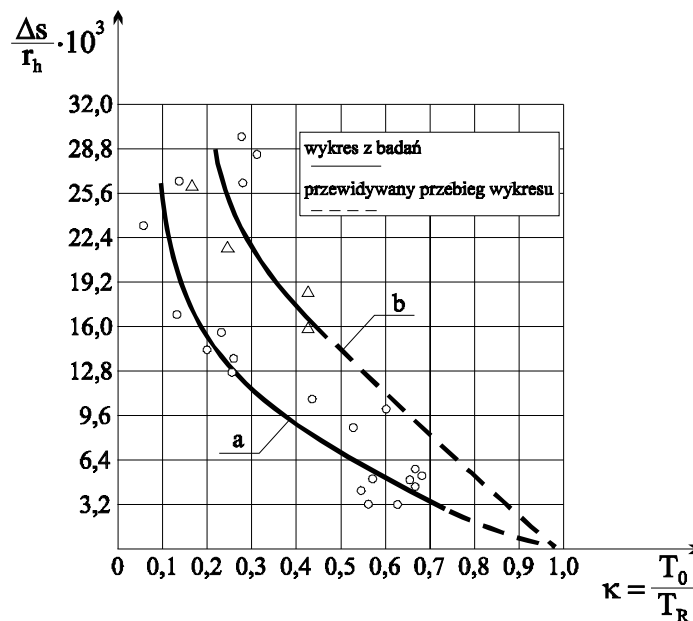
Rys. 3.12 Porównanie sił działających na przewód z wartościami wg Reimbertów i Foss Electric [72]

Kamiński i Zubrzycki [25, 27] podali wyniki swoich badań, z których wynika m. in., że maksymalne wartości sił działających na przewód są porównywalne dla napełniania i opróżniania komory. W trakcie napełniania wzrost sił jest prawie liniowy, a przerwanie

napełniania na pewien czas powoduje nieznaczny spadek sił obciążających. W momencie otwarcia zaworów wysypowych następuje gwałtowny spadek sił (do 25 %) obciążających. Przerwaniu procesu opróżniania towarzyszy powolny, nieznaczny wzrost sił obciążających. Wartości maksymalne sił obciążających otrzymane z badań autorów są mniejsze (40-60 %) niż wyliczone ze wzorów teoretycznych. Badania wykazały, że przewody powinny mieć możliwość przesuwu pionowego, gdyż zapewnia to zmniejszenie sił występujących w rurach.

W pracach [28-30] Kamiński i Zubrzycki podali wyniki badań modelowych i w skali naturalnej dotyczących sił działających na przewody odciążające.

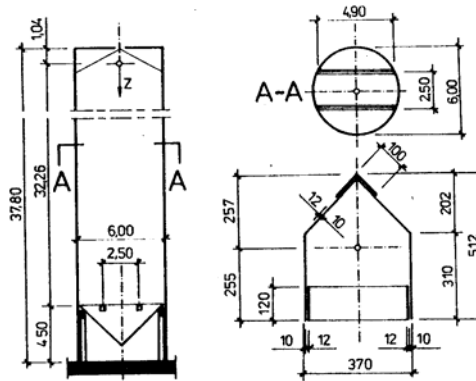
Rysunek 3.13 przedstawia wpływ przemieszczeń przewodu odciążającego na wartość pionowych sił działających na jego zewnętrzną powierzchnię. Oś pionowa $\Delta s/r_h$ wyraża iloraz względnej wartości przemieszczenia do promienia hydraulicznego. Oś pozioma zaś reprezentuje iloraz siły pomierzonej do siły obliczonej według Reimbertów - wzór (3.9). Najmniejsze wartości sił otrzymano dla największych wartości przemieszczeń $\Delta s/r_h = 28 \cdot 10^3$. Maksymalne uzyskane obciążenie przewodu wynosiło 70 % wartości siły obliczonej według Reimbertów. Wynik taki osiągnięto dla $\Delta s/r_h = 3,8 \cdot 10^3$ i niemożliwe było większe usztywnienie zawiesi (przemieszczenia zerowe). Wnioskiem płynącym z pracy jest to, że siła obliczona według Reimbertów daje wyniki poprawne dla sztywnych zamocowań. Efektem pracy było wprowadzenie współczynnika uwzględniającego podatność zawieszenia przewodu, korygujący wzór Reimbertów.



Rys. 3.13 Wpływ przemieszczeń przewodu odciążającego na wartość sił pionowych [30], badania modelowe (a), badania w skali naturalnej (b)

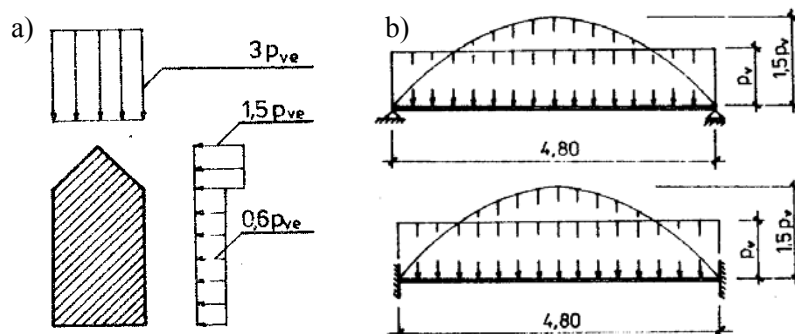
Rybiański i Szechiński [63] analizowali przestrzenną pracę tzw. belek napowietrzających stosowanych w niektórych silosach zbożowych do wentylowania i przewietrzania ziarna. Umieszczone w dolnej części komory, nad lejem, elementy te mają przekrój pokazany na rysunku 3.14.

Obciążenie elementów napowietrzających może mieć dwojaki charakter. W stanie spoczynku, przy zasypanej komorze, występuje długotrwały najczęściej stan statyczny. W przypadku zaś opróżniania występuje krótkotrwały stan dynamiczny.



Rys. 3.14 Usytuowanie i przekrój belek napowietrzających

W pierwszym przypadku elementy obciążone są głównie pionowo wypadkową parć pionowych. Parcia poziome równoważą się. Przy opróżnianiu natomiast mogą wystąpić jednostronne obciążenia poziome, które wraz z obciążeniami pionowymi powodują ukośne zginanie. Według Piepera [55] układ obciążeń działających na belkę powinien być przyjmowany jak na rysunku 3.15a. W przekroju podłużnym natomiast układ obciążeń powinien być przyjmowany jako krzywoliniowy (rys. 3.15b) odrębny dla momentów przęsłowych (podpora przegubowe) i podporowych (podpora sztywne).



Rys. 3.15 Zalecany układ obciążeń działających na element napowietrzający w przekroju poprzecznym (a) i podłużnym (b)

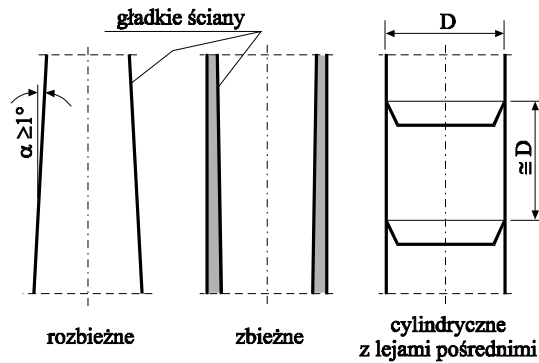
Rybiański [62] badał obciążenia sond do pomiaru temperatury, zawieszonych za pomocą kabli do stropu komory silosowej średnicy $D = 6$ m i średnicy $D = 9$ m, wysokości $H = 29$ m. Badano wpływ położenia sondy względem środka komory i rodzaju opróżniania na obciążenie przekazujące się na kabel. Wyznaczono współczynniki dynamiczne, wyrażone ilorazem największej siły podczas opróżniania do siły w stanie statycznym po napełnieniu (tab. 3.1).

Z wyników badań wynika, że najmniejszy przyrost obciążenia kabla, towarzyszący opróżnianiu, występuje dla kabla ze swobodnym końcem, zawieszzonego centrycznie w komorze opróżnianej centrycznie. Przy każdym rodzaju niesymetrii opróżniania bądź zawieszenia występują większe współczynniki dynamiczne. Największy współczynnik dynamiczny zaobserwowano dla niesymetrycznie zawieszzonego kabla, z końcem nieswobodnym, w komorze opróżnianej niesymetrycznie.

Tablica 3.1 Wyniki badań obciążeń kabli według Rybiańskiego [62]

Oznaczenie serii pomiarowej	Wartość obciążenia [kN] i współczynnika dynamicznego	
CNS-P	6C18	$7,7/6,1 = 1,26$
	6C12	$4,8/3,7 = 1,30$
	6C6	$1,8/1,4 = 1,28$
	6N18	$8,0/5,8 = 1,35$
CNN-P	6C18	$7,3/5,7 = 1,28$
	6N18	$12,0/6,0 = 2,00$
NNN-R	9C12	$11,9/8,8 = 1,35$ $20,1/11,6 = 1,73$
	9N12	$10,1/7,6 = 1,33$ $20,5/11,4 = 1,80$
Objaśnienia: CNS – zawieszenie sondy centryczne, niepodatne, koniec swobodny; CNN – zawieszenie sondy centryczne, niepodatne, koniec nieswobodny; NNN – zawieszenie sondy niecentryczne, niepodatne, koniec nieswobodny; P – pszenica, R – rzepak. 6C18 – komora średnicy 6 m, opróżniana centrycznie, kabel zagłębiony na głębokość 18 promieni hydraulicznych; 9N12 – komora średnicy 9 m, opróżniana niecentrycznie, kabel zagłębiony na głębokość 12 promieni hydraulicznych.		

McLean i Moore [43] przedstawili wytyczne projektowania perforowanych wież rozładowniczych, służących do rozprawiania materiału na składowisku umieszczonym na otwartej przestrzeni. Wieża stojąca nad lejami wysypowymi pełni również funkcję rury opróżniającej i zmniejszającej naprężenia w ośrodku sypkim. Optymalnym kształtem przekroju poziomego rury jest koło, ale dopuszcza się też wielobok foremny. Autorzy zalecają, aby średnica rury była możliwie największa a przynajmniej większa niż wielkość przesklepienia charakterystycznego dla danego materiału. Rury małych średnic powinny być rozbieżne, a dużych średnic zbieżne ku dołowi (rys. 3.16).



Rys. 3.16 Zalecane przekroje rur rozładowniczych według McLean'a [43]

Otwory perforacyjne powinny być pionowe o przekroju prostokątnym ze skosami na krawędziach w kierunku zewnętrznym rury. Liczba otworów umieszczonych w jednym poziomie na obwodzie powinna zmniejszać się ku górze, a w dolnej części powinna zapewniać równomierny zasyp składowiska i nie może powodować niecentrycznego przepływu przy opróżnianiu. Podparcie wieży powinno być wykonane z ukośnych zastrzałów, których końce sięgają poza najbliższe sąsiedztwo leja. Zakłada się obciążenie zastrzałów naporem pionowym i normalnym od niecentrycznego przepływu.

Głównym obciążeniem wieży jest siła ściskająca F , obliczana ze wzoru:

$$F_z = C_m \left(P \cdot \mu \cdot \rho \cdot g \cdot K \cdot \frac{z^2}{2} + A \cdot \rho \cdot g \cdot z \right) + P \cdot \rho_{sm} \cdot g \cdot z + F_{AD} + F_{AL}, \quad (3.13)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego wieży,

C_m – współczynnik empiryczny $C_m = 2,5$,

D – średnia średnica rury,

F_z – ściskająca siła osiowa w poziomie z ,

F_{AD} – część stała obciążenia pionowego przyłożonego w wierzchołku wieży,

F_{AL} – część zmienna obciążenia pionowego przyłożonego w wierzchołku wieży,

K – iloraz naporów (zwykle $K=0,4$; dla ostrych materiałów $K=1,0$),

P – średni obwód wieży,

z – głębokość mierzona od najwyższego punktu składowiska,

ρ – ciężar objętościowy składowanego materiału,

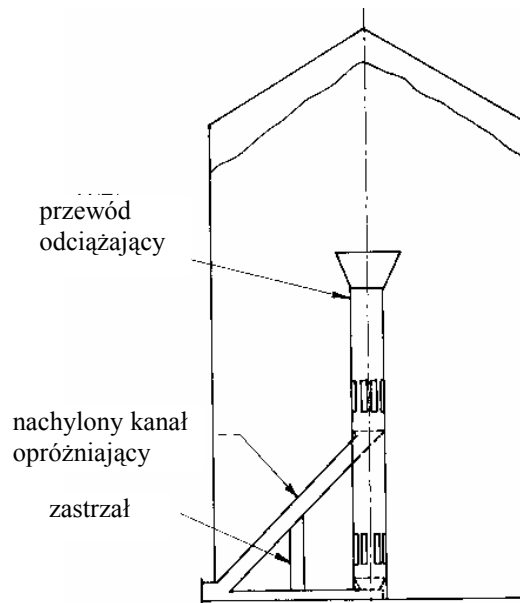
ρ_{sm} – ciężar własny powierzchni bocznej wieży,

μ – współczynnik tarcia materiału o ścianę wieży,

ϕ – kąt tarcia materiału o ścianę wieży.

McLean [42] proponuje stosowanie zmodyfikowanych konstrukcji wyładowczo-odciążających. W przypadku, gdy wymagany jest względnie duży wydatek, zaleca stosowanie konstrukcji przedstawionej na rys. 3.17.

Oprócz klasycznego trzonu przewód odciążający stanowi króciec podparty zastrzałem. Króciec połączony jest z końcem ślimakowego kanału rozładowniczego. Rozwiązanie takie zapewnia duży wydatek opróżniania. McLean zaleca, aby średnica ukośnego króćca była minimum 4,5 razy większa niż maksymalny rozmiar bryły ośrodka sypkiego.



Rys. 3.17 Zmodyfikowana wieża rozładownicza zapewniająca duży wydatek [42]

Wszystkie elementy pograżone w ośrodku sypkim powinny być zaprojektowane na przeniesienie siły skierowanej w dół o wartości:

$$F = \frac{2,5 A_p D \rho g}{4 \mu K} \left(1 - e^{-2 \mu K (2z + H_s / (1+m)) / D} \right), \quad (3.14)$$

gdzie: A_p – pole powierzchni górnej elementów pograżonych w ośrodku sypkim [m²],

H_s – poziom zasypu komory [m],

D – średnica silosu [m],

K – współczynnik naporu – zwykle $K = 0,4$,

m – zmienna, $m=0$ dla przepływu centrycznego i $m=1$ dla przepływu niecentrycznego,

z – głębokość silosu [m],

ρ – gęstość objętościowa składowanego materiału [kg/m³],

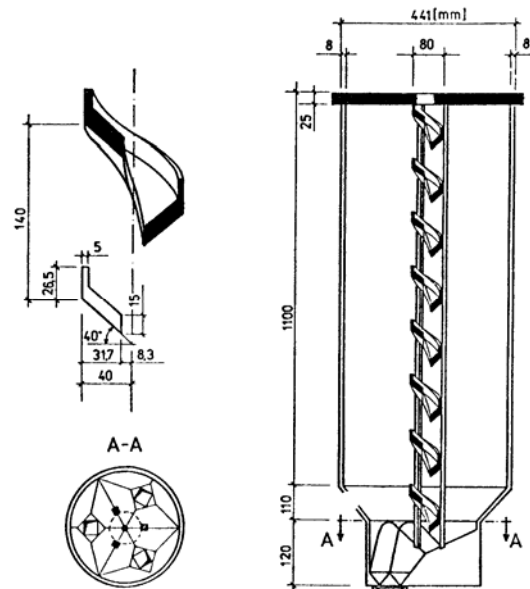
μ – współczynnik tarcia o ścianę, $\mu = \tan \phi$.

Dodatkowo autor zaleca stosowanie okładziny trudno ścieralnej w okolicach zwiększonych prędkości przepływu.

Badania zsuwni eliminującej kruszenie się materiału podczas napełniania przedstawiono w pracy Borcza [4]. Spiralna zsuwnia, zamocowana jest sztywno w dnie modelu cylindrycznego o ścianach ze szkła organicznego (rys. 3.18).

Badaniom poddano piasek kwarcowy w dwóch modelach: średnicy 283 mm i wysokości 1330 mm oraz średnicy 425 mm i wysokości 1100 mm. Zsuwnia miała średnicę $d_s = 80$ mm. W poziome zamocowania mierzono odkształcenia zsuwni za pomocą tensometrów.

Do analizy przyjęto, że na zsuwnię działa tylko materiał znajdujący się w jej sąsiedztwie ($2,5d_s$ od środka komory).



Rys.3.18 Model badawczy Rolewicza ze zsuwnią [4]

Pomierzone odkształcenia były największe dla opróżniania przez otwór usytuowany mimośrodowo względem zsuwni.

Siłę osiową wyznaczono analitycznie ze wzoru:

$$N_x = \gamma_o \cdot \Pi \cdot \left(\frac{2,5d_s^2}{4} \right) \cdot z, \quad (3.15)$$

gdzie: γ_o – ciężar objętościowy piasku $16,0 \text{ kN/m}^3$.

Stąd, po podstawieniu:

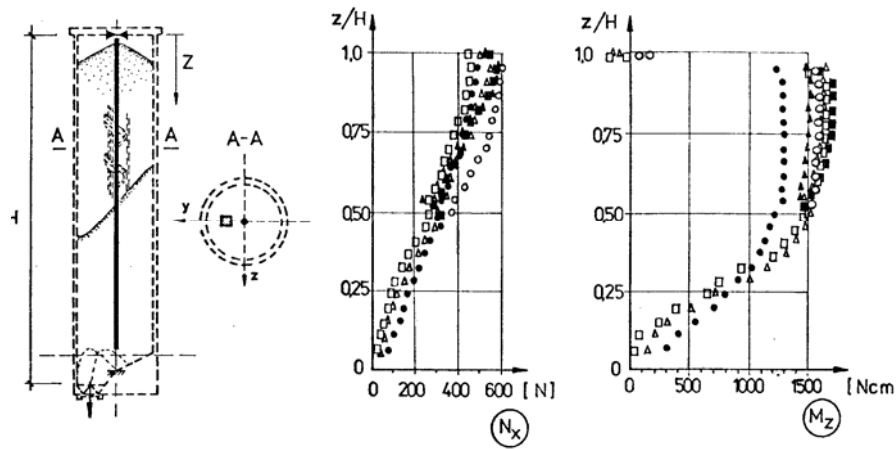
$$N_x = 5 \cdot z = 6 \text{ kN} \quad (3.16)$$

Zginanie słupa tworzącego zsuwnię obliczono tak, aby uzyskać zgodność z wynikami doświadczalnymi, wykorzystując linię wpływu momentu zamocowania. Moment zginający pochodzi od niesymetrycznie działającego materiału zaklinowującego się po przeciwnej stronie zsuwni niż otwór wysypowy. Przy niesymetrycznym opróżnianiu moment równomiernie rozłożony można obliczać w [Nm/m] ze wzoru:

$$m = \gamma_o \cdot \frac{\Pi}{4} \cdot 2,5d_s^2 e, \quad (3.17)$$

gdzie: $e = d_s/2$.

Wykresy sił osiowych i momentu zamocowania przedstawiono na rysunku 3.19.



Rys.3.19 Wyniki badań modelowych Rolewicza [4]

Ooms i Roberts [52, 53] przeprowadzili przybliżoną analizę obciążeń działających na króciec odciążający (rys. 3.20), zakładając symetryczny rozkład naporów w przekroju poziomym komory według teorii Janssena:

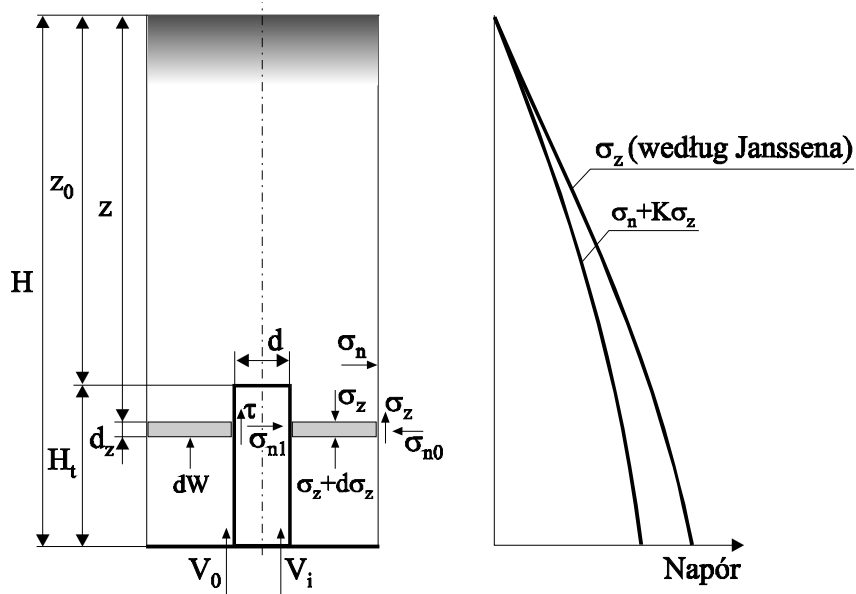
$$\sigma_z = \frac{\gamma D}{4\mu k} \left[1 - e^{-4\mu \frac{z}{D}} \right], \quad (3.18)$$

$$\sigma_n = k\sigma_z, \quad (3.19)$$

$$\tau = \mu k\sigma_z. \quad (3.20)$$

Zakładając, że dla $z = z_0$ napór $\sigma_z = \sigma_{z0}$ otrzymuje się związek:

$$\sigma_z = \left[\left(\sigma_{z0} - \frac{\gamma}{\beta} \right) e^{\beta z_0} e^{-\beta z} + \frac{\gamma}{\beta} \right], \quad (3.21)$$



Rys. 3.20 Schemat wyznaczania obciążeń w komorze wyposażonej w króciec [53]

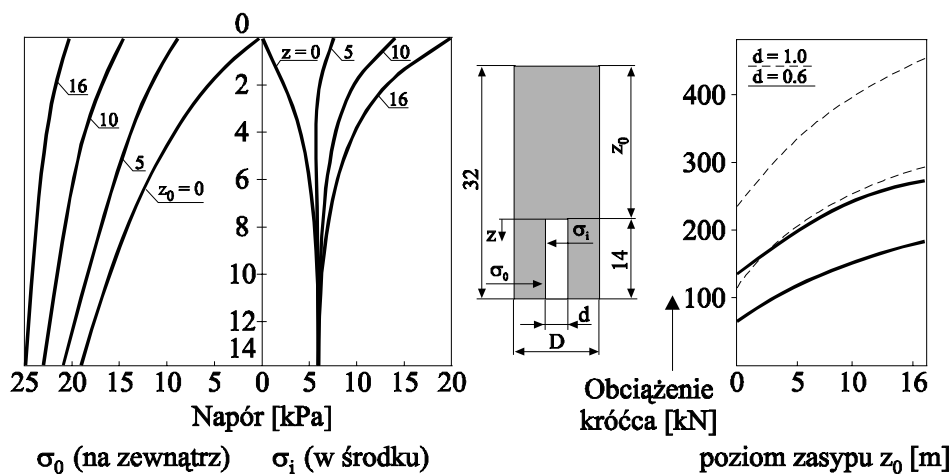
Rozpatrując powyższe zależności otrzymaliśmy związki na siły pionowe działające na przewód od zewnątrz:

$$V_0 = k_i \mu_i \pi d \left[- \left(\sigma_{z0} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \frac{1}{\beta} (e^{-\beta h_i} - 1) + \frac{\gamma h_i}{\beta} \right], \quad (3.22)$$

i wewnątrz niego:

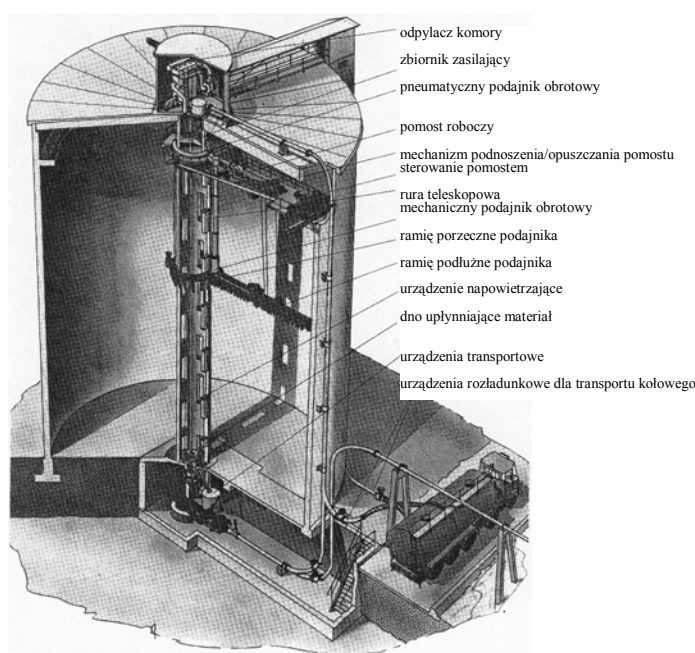
$$V_i = \frac{\pi d^2}{4} \left[\sigma_{z0} - \frac{\gamma d}{4 \mu'_i k_i} \right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{4 \mu'_i k_i h_i}{d}} \right] + \frac{\pi \gamma d^2 h_i}{4}. \quad (3.23)$$

Wynikiem analizy było określenie sił działających na rurę średnicy 0,6 m i 1,0 m, w które wyposażono komorę wysokości $H = 32$ m i $D = 10,7$ m. Wyniki przedstawia rysunek 3.21.



Rys. 3.21 Napór i siły działające na króciec odciążający według badań Roberts'a [53]

Safarian i Harris [64, 65] opisali zastosowanie wieży rozładkowej do opróżniania silosów wielkich średnic. Wieża taka, stalowa bądź żelbetowa, ustawiona nad otworem wysypowym w dnie, pełni rolę podpory dla taśmociągu zasypowego, a także dzięki otworom na pobocznicy spełnia rolę urządzenia opróżniającego. W niektórych wersjach stanowi też oparcie dla ślimaka, który zbiera materiał zasypując wieżę. Zaletą opróżniania z użyciem wieży jest minimalna ilość tworzącego się pyłu. Wieże rozładkowe osiągają wysokość 46 m, a średnice zwykle 1,8 do 4,6 m. Widok silosu wyposażonego w wieżę przedstawia rysunek 3.22.



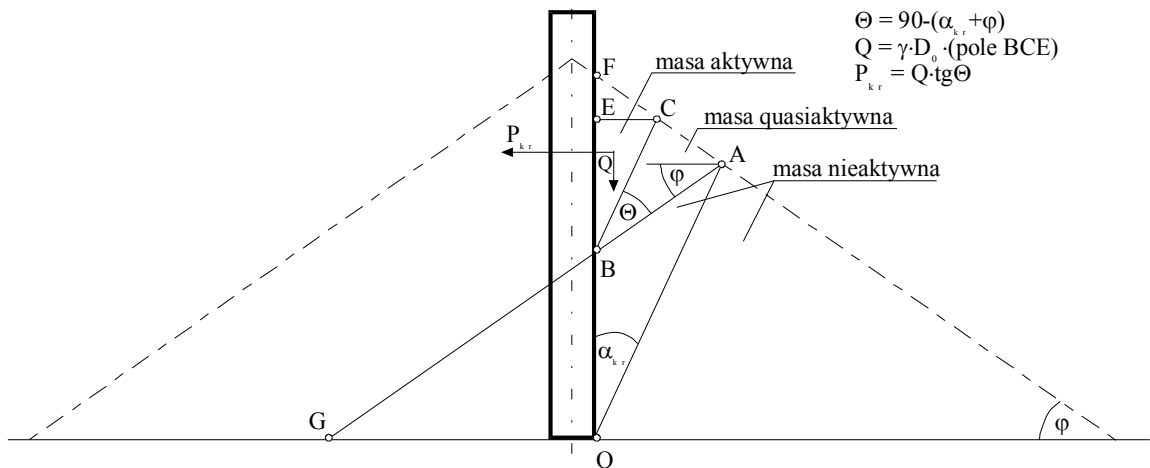
Rys. 3.22 Komora typu Pneumech Silo na popioły lotne wyposażona w wieżę opróżniającą [64]

Projektowanie urządzenia tego typu można podzielić na technologiczne i konstrukcyjne. Pierwsze uwzględnia geometrię, sposób opróżniania, wielkość i rozmieszczenie otworów wysypowych, które to cechy decydują o potrzebnym przepływie. Projektowanie konstrukcyjne polega na ekonomicznym przyjęciu rodzaju konstrukcji i sprawdzeniu warunków wytrzymałościowych wieży poddanej oddziaływaniom, podzielonym według autorów na:

- stałe (ciężar rury, część stała obciążenia od taśmociągu zasypowego, ciężar materiału wewnątrz rury przy obliczaniu wpływów sejsmicznych),
- zmienne (część zmienna obciążeń od taśmociągów, obciążenie wiatrem – jeśli wieża pracuje na otwartym składowisku, obciążenie od składowanego materiału i obciążenia sejsmiczne).

Z punktu widzenia niniejszej pracy najbardziej interesujące są obciążenia od składowanego materiału. Autorzy zalecają, aby uwzględniać je jako obciążenie zmienne, zarówno materiał we wnętrzu rury jak i na zewnątrz niej. Wyróżnili cztery sytuacje projektowe, jakie zaleca się uwzględnić w obliczeniach:

- rura pełna, komora pusta,
- rura pusta, komora pełna,
- rura pełna, komora pełna,
- sytuacja jak na rysunku 3.23 , z usuniętą 1/6 objętości składowiska.



Rys. 3.23 Sytuacja obliczeniowa do projektowania wieży opróżniającej [63, 64]

Autorzy pracy zalecają przeanalizowanie 9 kombinacji oddziaływań, spośród których trzy nie zawierają oddziaływań wiatru i wpływów sejsmicznych. Są to:

- rura pełna (ciężar własny i materiał w środku), zasypana całkowicie przez otaczający materiał, pełne obciążenie pionowe od taśmociągu zasypowego, siła pozioma od taśmociągu,
- rura pełna (ciężar własny i materiał w środku), zasypana w 5/6 obszaru (rys. 3.23), pełne obciążenie stałe i zmienne taśmociągu, siła pozioma od taśmociągu,
- rura pusta, zasypana całkowicie przez otaczający materiał.

Obciążenia, przyjmowane przez autorów pracy [64, 65], przyjęte za Reimbertami [56] podzielono na czynne i bierne. Parcie czynne działające na wysokości Y na jednostkę długości poziomej wynosi:

$$p_a = \gamma \cdot Y \cdot \frac{(1 - 2\rho / \pi)^3}{(1 + 2\rho / \pi)^2}, \quad (3.24)$$

gdzie: γ – ciężar objętościowy składowanego materiału,

ρ – kąt stoku naturalnego składowanego materiału

Y – wysokość nad poziomem składowiska.

Całkowite parcie czynne w poziomie podstawy kolumny rozładowniczej wynosi:

$$P_a = \gamma \cdot \frac{H_p^2}{2} \cdot \frac{(1 - 2\rho/\pi)^3}{(1 + 2\rho/\pi)^2}, \quad (3.25)$$

gdzie: H_p – wysokość kolumny.

Parcie bierne (używane przy obliczaniu momentu wywracającego) wyznacza się ze wzoru:

$$p_p = \gamma \cdot Y \cdot \frac{(1 - 2\rho/\pi)^2}{(1 + 2\rho/\pi)}, \quad (3.26)$$

a całkowita siła od parcia biernego wynosi:

$$P_p = \gamma \cdot \frac{H_p^2}{2} \cdot \frac{(1 - 2\rho/\pi)^2}{(1 + 2\rho/\pi)}. \quad (3.27)$$

Obciążenie od tarcia materiału na zewnątrz rury są niezależne od parcia poziomego. Przy założeniu, że kąt tarcia o ścianę jest równy kątowi stoku naturalnego, siła pionowa na jednostkę powierzchni od tarcia wynosi:

$$V = p \cdot \operatorname{tg} \rho, \quad (3.28)$$

gdzie: p – parcie p_a lub p_p w zależności od sytuacji obliczeniowej,

a całkowite obciążenie pionowe:

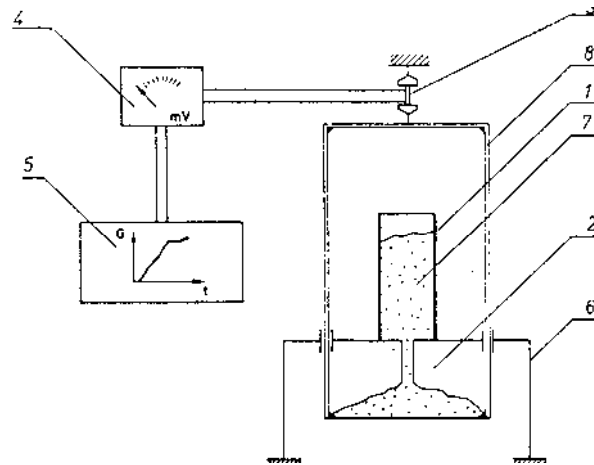
$$\Sigma V = P \cdot \operatorname{tg} \rho. \quad (3.29)$$

Obciążenie od tarcia materiału w środku kolumn o średnicy nie mniejszej niż 2,4 m zalecają obliczać według Janssena lub Reimbertów, natomiast dla pozostałych średnic można przyjąć siłę równą 75 % ciężary materiału w kolumnie.

3.4 Badania doświadczalne i teoretyczne przepływów materiału sypkiego

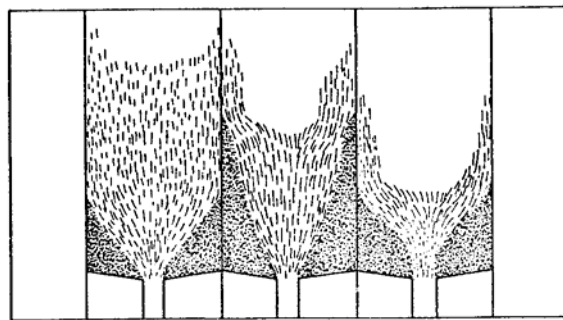
Borcw w pracy [4] przedstawił wyniki prac doświadczalnych dotyczących swobodnego wypływu materiału sypkiego, m.in. rzepaku i gorczycy z silosu modelowego.

Do rejestrowania ilości wypływającej masy służyło stanowisko przedstawione na rysunku 3.24.



Rys. 3.24 Stanowisko Borcza do pomiaru wydatku opróżniania [4]

Dzięki przezroczystej ścianie modelu, stosując fotografowanie z przedłużonym czasem naświetlania, uzyskano obrazy przepływu schematycznie przedstawione na rysunku 3.25.



Rys. 3.25 Obrazy przepływu w modelu Borcza [4]

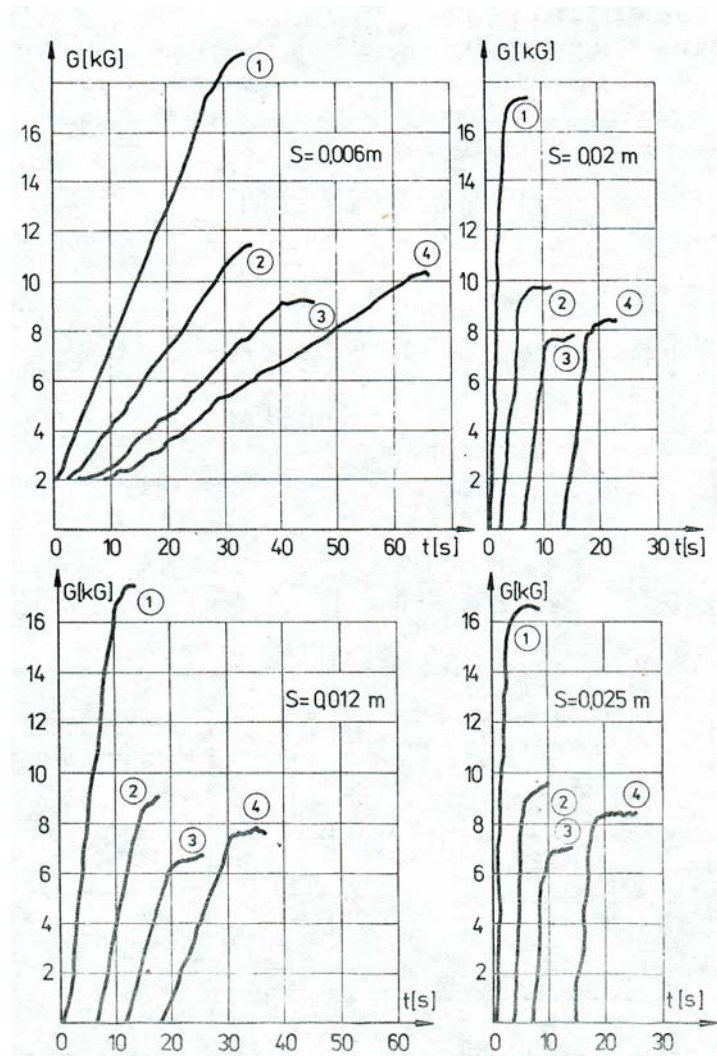
W celu określenia funkcji wydatku autor posłużył się analizą wymiarową, przyjmując jako bazowe parametry: ρ_o – gęstość pozorna materiału sypkiego, g – przyspieszenie ziemskie i S – szerokość szczeliny wysypowej. Zauważył, że parametry S/H i S/B , gdzie H – wysokość napełnienia, B – szerokość modelu, nie mają wpływu na wartość wydatku. Podobne wnioski można znaleźć w pracy [47, 48]. Otrzymano doświadczalnie ciągłe wykresy ilości wypływającego materiału w czasie (rys. 3.26), dla różnych materiałów: gorczycy (1), piasku (2), rzepaku (3) i cukru (4) i dla różnych szerokości szczeliny S .

Ostatecznie, funkcja opisująca wydatek ma postać:

$$Q_z = f\left(\frac{S}{D}\right) \cdot \rho_o \cdot \sqrt{gS^3} L_0, \quad (3.30)$$

gdzie: D – średnica ziarna materiału sypkiego – średnia z przesiewu [m],

L_0 – długość szczeliny i modelu [m].



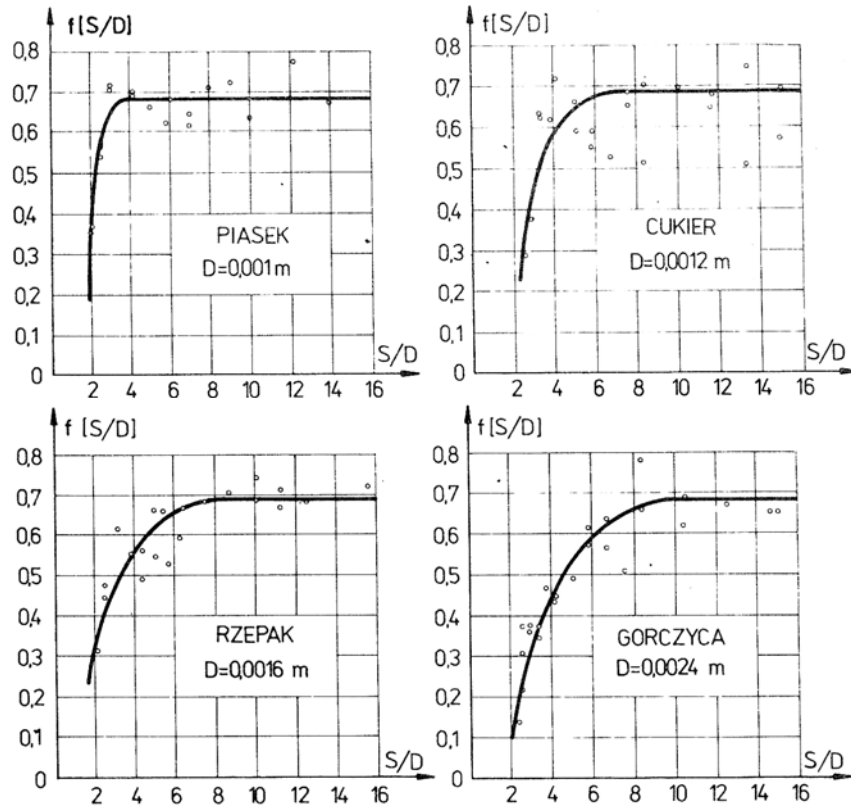
Rys. 3.26 Ilość wyływającego ziarna w czasie dla różnych materiałów i szerokości szczeliny według badań Borcza [4]

Wyznaczono doświadczalnie wartość funkcji $f(S/D)$, występującej we wzorze (3.30) i otrzymano:

$$Q_z = 0,69 \cdot \rho_o \cdot \sqrt{gS^3} L_o, \quad (3.31)$$

przy założeniu, że $S/D > D$ i $L_o > 10S$ oraz, że gęstość objętościowa będzie stała.

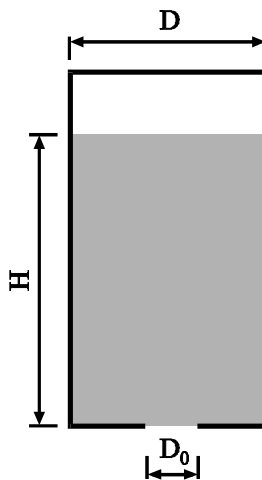
Graficzne przedstawienie zależności i wyników badań doświadczalnych przedstawiono na rysunku 3.27.



Rys. 3.27 Aproksymacja wyników badań doświadczalnych przy pomocy zależności (3.31)

Widoczna na wykresach krzywoliniowa zależność (dla małych wartości S/D) nie została przez Autora określona.

Zjawiska zachodzące przy opróżnianiu komory, charakter przepływu i wielkości wydatków opróżniania było wielokrotnie analizowane przez badaczy. Zauważono, że wysokość zasypu H (rys. 3.28) nie ma większego wpływu na wielkość wydatku podczas opróżniania przez otwór średnicy D_0 .



Rys. 3.28 Komora silosowa zasypana do wysokości H

Janssen [16] wykazał, że ciężar materiału sypkiego przenoszony jest na ściany, a napór w okolicy otworu wysypowego nie zależy od poziomu zasypu. Większość badaczy stwierdziło brak wpływu poziomu zasypu H na wielkość wydatku W . W późniejszych raportach pojawia się krytyczna wartość H , powyżej której nie stwierdza się wpływu na wielkość wydatku. Demming i Mehring [48] podają wartość $H = 2,5D_0$. Jest to zatem stan, kiedy komora jest prawie pusta i można go nie brać pod uwagę. Podobnie należy się zgodzić, że wydatek nie zależy od średnicy komory D , pod warunkiem, że D nie jest za małe. Zarówno Ketchum [48] jak i Brown i Richards [48] wykazali, że wydatek jest stały dla $D > 2,5D_0$. Franklin i Johanson [48] przyjęli inne kryterium: $D - D_0 > 30d$, gdzie d – średnica cząstki materiału sypkiego. Dla mniejszych wartości D cała masa materiału przyspiesza proporcjonalnie do przyspieszenia ziemskiego. Beverloo [3, 48] swoje wyniki przedstawił w formie graficznej (rys. 3.29). Wartość parametru Z powiązał z rozmiarem cząstki w zależności $Z = kd$, gdzie k – stała zależna od kształtu cząstki. Rozszerzył zastosowanie zależności na każdy rodzaj przepływu, uwzględniając również wielkość cząstki materiału sypkiego:

$$W = C\rho_i\sqrt{g}(D_0 - kd)^{5/2} \quad (3.32)$$

gdzie: C – bezwymiarowa stała empiryczna, zależna od kształtu zbiornika ($0,55 < C < 0,65$),

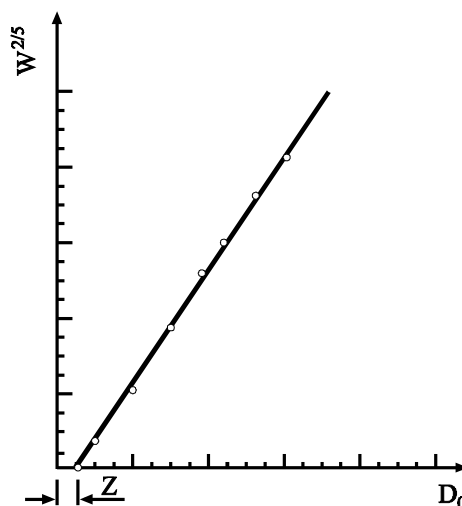
ρ_i – początkowa (podczas napełniania) gęstość objętościowa materiału sypkiego,

k – stała wyznaczana empirycznie zależna od kształtu cząstki,

d – średnica cząstki,

g – przyspieszenie ziemskie.

Zwykle, dla cząstek o kształcie sferycznym przyjmuje się $k = 1,5$.



Rys. 3.29 Wykres zależności wydatku W od średnicy otworu wysypowego D_0 według Beverloo [3]

Brown i Richards, a także Laohakul [48] analizowali zachowanie się cząstek w bliskim sąsiedztwie otworu wysypowego. Stwierdzili oni istnienie w pobliżu krawędzi otworu wysypowego strefy spowolnionego przepływu grubości kilku cząstek. W strefie tej występują silne naprężenia ścinające, a określony wcześniej iloczyn kd można uważać właśnie za jej grubość. W późniejszym czasie wykonano szereg badań modelowych weryfikujących zależność (3.32). Otrzymano zbliżone wyniki. I tak, Fowler i Glastonbury [48] proponują zależność:

$$W = A(D_h)^{1/2} \left\{ \frac{D_h}{d} \right\}^{0,185} \quad (3.33)$$

gdzie: A – pole przekroju otworu wysypowego,

D_h – średnica hydrauliczna otworu wysypowego.

Rose i Tanaka [48] otrzymali z kolei związek:

$$W = D_0^{5/2} \left\{ \frac{D_0}{d} - 3 \right\}^{0,3} \quad (3.34)$$

Jeszcze inną zależność przedstawia Harmens [48]:

$$W = D_0^{5/2} \left\{ f(\phi) - \frac{0,35(d/D_0)^{1,5}}{0,45 + (d/D_0)^{1,5}} \right\} \quad (3.35)$$

gdzie: $f(\phi)$ – funkcja zależna od kąta stoku naturalnego ϕ materiału.

Nedderman [48] podkreśla, że mimo, iż wzory (3.33-3.35) dają w określonych warunkach poprawne wyniki, nie są tak uniwersalne jak wzór Beverloo (3.32). Nedderman wymienia istniejące ograniczenia stosowania tych wzorów. Wszystkie obowiązują dla materiałów o wielkości cząstki $d > 500\mu\text{m}$, ponieważ w materiałach o drobniejszych cząstkach mogą wystąpić nad otworem wysypowym trwałe przesklepienia. Z kolei dla otworów mniejszych niż $6d$ przepływ staje się nieciągły, przerywany. We wszystkich związkach istnieje analogia do mechaniki płynów, gdzie wydatek cieczy ze zbiornika o wysokości napełnienia H , jak na rysunku 3.27 określa się wzorem:

$$W = \sqrt{g} D_0^2 \sqrt{H} . \quad (3.36)$$

Porównując związki dla materiałów sypkich łatwo zauważyć, że największy wpływ na wydatek mają współczynniki związane z samym otworem wysypowym i jego najbliższym sąsiedztwem. Każdy z członów równania Beverloo był wnikliwie weryfikowany przez innych badaczy. Huntington i Rooney [48] zawężili wartość współczynnika C do zakresu $0,575 < C' < 0,595$ przez zastosowanie pojęcia gęstości płynięcia ρ_f zamiast gęstości początkowej (nasypanej). Gęstość ta jest ilorazem wydatku masy przez wydatek (ubytek) objętości

powstałej przy zapadaniu się powierzchni górnej materiału sypkiego. Inni badacze rozpatrywali nierównomierny rozkład gęstości materiału po wysokości zbiornika, otrzymując różnice w wartościach do 20 %.

Wymienione wcześniej wzory uwzględniają wpływ kąta stoku naturalnego i kształt otworu (średnica hydrauliczna). Jest to ważny czynnik, wpływający na wielkość wydatku. Badania z użyciem otworu prostokątnego o wymiarach $b \times l$, gdzie $b \ll l$ przeprowadzili Myers i Sellers [48]. Podali oni związek również zawierający średnicę hydrauliczną D_h :

$$W = 1,03 \rho \sqrt{g} (l - kd)(b - kd)^{3/2} = 0,73 \rho A^* (g D_h^*)^{1/2} \quad (3.37)$$

gdzie: A^* – efektywne pole przekroju otworu wysypowego,

D_h^* – zredukowana średnica hydrauliczna otworu wysypowego.

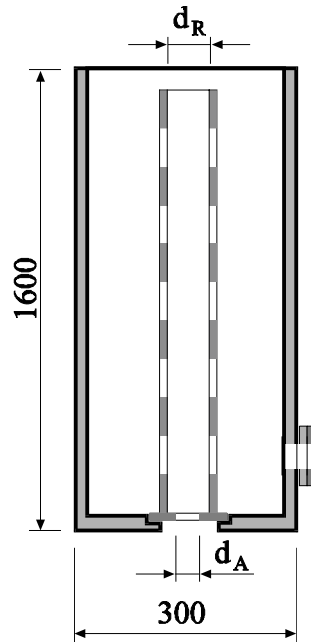
Drugi zapis we wzorze (3.37) pochodzi z przekształcenia wzoru Beverloo:

$$W = \frac{4C}{\pi} \rho A^* (g D_h^*)^{1/2} \quad (3.38)$$

Na uwagę zasługują rezultaty badań Chitty'ego i Spencer'a [48], którzy zbadali wydatek opróżniania przez otwór w pionowej ścianie. W tym przypadku również można opisywać wydatek zależnością typu $W = A(h)^{1/2}$.

Firewicz [12] przeanalizował istniejące wzory empiryczne pod względem dokładności. Zastosował trzy kryteria oceny dokładności: wartości bezwzględnej błędu względnego BW_s i BW_m , krotności występowania wydatku W_{ob} w przedziałach modalnych (z użyciem histogramów częstotliwości), oraz według krotności występowania W_{ob} w przedziałach estymacyjnych odnoszących się do średniej populacji na trzech poziomach ufności. Oryginalna procedura porównawcza pozwoliła na uporządkowanie wzorów w trzech klasach dokładności. W pierwszej klasie znalazły się m.in. zależności autora i Neddermana [46]. Zależność Beverloo [3] znalazła się w trzeciej klasie dokładności.

Schulze i Schwedes [66-68] rozszerzyli zastosowanie wzoru Beverloo na obliczanie wydatków z komór wyposażonych w rurowe urządzenia odciażające. Z powodzeniem wyznaczają z zależności (3.32) wydatki materiału wypływającego z komory jak i wpływającego do rury. Wyniki ich analiz potwierdzają dużą uniwersalność wzoru Beverloo. Badania przeprowadzili na obiekcie modelowym o wymiarach 300x300x1600 mm, wyposażonym w pionowy przewód odciażający (rys. 3.30).



Rys. 3.30 Model Schwedesa do określania wydatku z komory wyposażonej w rurowe urządzenie odciążające [67]

Zmieniało średnicę przewodu d_R (46, 71 i 104 mm), średnicę otworu wysypowego d_A , średnicę otworu bocznego.

Badano rodzaj przepływu i wielkość wydatku materiału sypkiego przez rury z otworami i bez otworów, w ściankach i w dnie.

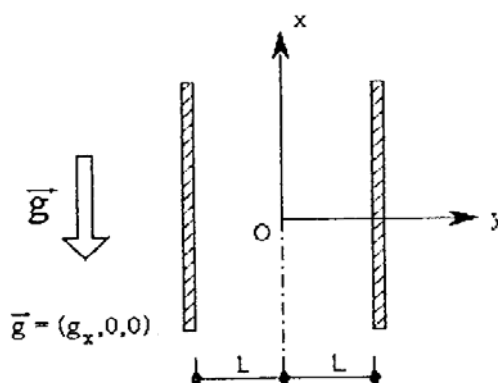
Materiałem użytym do badań był m.in. wapień, węgiel brunatny oraz plastikowe kulki. Wszystkie materiały miały granulację odpowiednią do skali modelu. Z ciekawych wniosków można przytoczyć, że np. dla niektórych materiałów osiągnięto przepływ 3-krotnie większy przy zastosowaniu przewodu odciążającego, niż bez jego użycia. Na podstawie obserwacji wywnioskowano również, że zjawisko segregacji może zostać skutecznie zmniejszone przez zastosowanie urządzenia odciążającego.

Niedostatkiewicz [49] badał wpływ obecności rury perforowanej i pełnej na intensywność efektów rezonansowych w modelowym silosie. Rura perforowana powoduje nieznaczne skrócenie czasu trwania rezonansu. Autor nie stwierdził znacznej redukcji efektów rezonansowych przy użyciu rur perforowanych. Autor przeprowadził porównanie wartości wydatku, otrzymanego ze swoich badań z obliczonym według wzorów spotykanych w literaturze (tab. 3.2).

Tablica 3.2. Porównanie wartości wydatków z modeli teoretycznych z badaniami Niedostatkiewicza [49]

Lp.	Autor	Zależność teoretyczna	Wydatek [kN/s]		
			$d_o=0,04m$	$d_o=0,07m$	$d_o=0,12m$
1	Wieghardt	$W = 0,557\gamma\sqrt{g}(d_o - 0,04)^{2,50}$	0,0000	0,0042	0,0495
2	Firewicz	$W = 0,616\gamma\sqrt{g}(d_o - 2,11d_{50})^{2,50}$	0,0087	0,0369	0,1458
3	Beverloo	$W = 0,647\gamma\sqrt{g}(d_o - 2,90d_{50})^{2,50}$	0,0088	0,0380	0,1511
4	Shirai	$W = 0,332\gamma\sqrt{g} \cdot d_{50}^{2,50} / \sqrt{\tan\phi}$	0,0064	0,0262	0,1010
5	Schwedes	$W = 0,50\sqrt{g \cdot d_{50}} \cdot A$	0,1392	0,1837	0,2410
6	Fowler/ Glasnonbury	$W = 14,16\sqrt{2gr_h} \cdot A \cdot [r_h / d_{50}]^{0,185}$	0,4465	6,5254	9,4375
7	Niedostatkiewicz	-	0,0086	0,0401	0,1864

Khelil i Roth [31] poczynili badania doświadczalne i teoretyczne z zakresie przepływu materiału sypkiego w płaskim kanale (rys. 3.31).



Rys. 3.31 Układ współrzędnych w analizie Khelila i Rotha [31]

W analizie teoretycznej wykorzystali model Haffa [14]. W modelu tym przyjmuje się analogię z cieczą, polegającą na założeniu niesprężystych i krótkotrwałych zderzeń międzycząsteczkowych. Wiodący wpływ na powstanie ruchu masy cząstek mają siły styczne pochodzące od lepkości. We współrzędnych pokazanych na rysunku 3.30, prawo zachowania energii przyjmuje postać:

$$\frac{d}{dy} \left(u\eta \frac{du}{dy} + k \frac{d}{dy} \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \rho u g + I, \quad (3.39)$$

gdzie:

$$\eta = qd^2 \rho \frac{v}{s}, \quad k = rd^2 \frac{v}{s}, \quad I = \gamma \rho \frac{v^3}{s} \quad (3.40-3.42)$$

I – strata energii podczas zderzenia dwóch cząstek,

u – prędkość przepływu,

η – współczynnik lepkości,

ρ – gęstość objętościowa materiału,

d – średnica cząstki,

γ – współczynnik restytucji energii ($\gamma = 0$ dla zderzeń idealnie sprężystych i $\gamma = 1$ dla zderzeń idealnie niesprężystych,

r, q – stałe bezwymiarowe.

Natomiast równanie na prędkość fluktuacji będzie postaci:

$$\frac{d^2 V}{dY^2} + V \frac{I}{r\delta^2} \left(\frac{t^2}{P_0^2 q} 4Y^2 - \gamma \right) = 0, \quad (3.43)$$

gdzie:

$$Y = \frac{y}{2L}, \quad \delta = \frac{d}{2L}, \quad V = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \quad P_0 = \frac{\rho}{pgL}, \quad (3.44-3.47)$$

p – napór pionowy.

Równania na prędkość przepływu:

$$U = \frac{t}{\beta_p P_0} V_p + \frac{2t}{q\delta P_0} \int_{-0,5}^y V(Y) dY \quad (3.48-3.49)$$

$$U = \frac{u}{\sqrt{gL}}$$

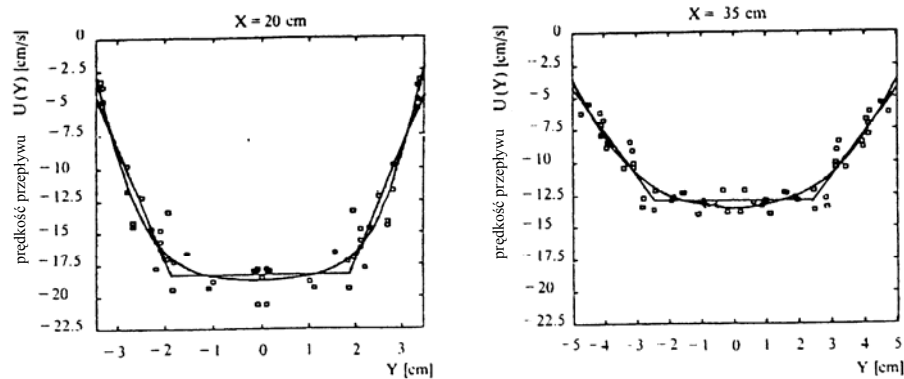
gdzie:

V_p – bezwymiarowa prędkość fluktuacji przy ścianach.

Weryfikujące badania doświadczalne wykonano na płaskim modelu (głębokość 3 cm), wysokości 80 cm i szerokości 55 cm. Sporządzono profile prędkości przepływu i porównano je z wynikami badań modelowych. Rysunek 3.32 przedstawia profile prędkości w poziomie 20 i 35 cm.

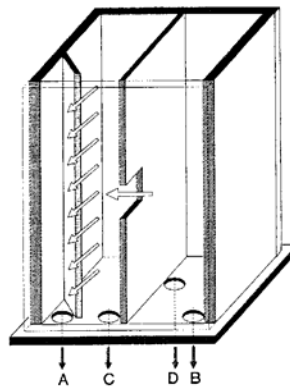
Autorzy badali też wpływ nachylenia ścian bocznych na profil prędkości. Dla kątów nachylenia od pionu mniejszych niż 10° otrzymali dobrą zgodność wyników doświadczalnych i teoretycznych. Dla większych kątów nie było takiej zgodności. Tłumaczą to tym, że dla

mniejszych kątów głównym czynnikiem sprawczym ruchu są siły styczne pochodzące od lepkości, a dla większych kątów dominują siły tarcia bocznego cząstek.



Rys. 3.32 Profile prędkości przepływu płaskiego według [31]

Badania modelowe przepływu w silosie ze wstawkami przewodów Kóta [34]. Niewielki model (150x150x300 mm) wyposażono w pionowe przegrody z otworami w celu obserwacji przepływu (rys. 3.33).

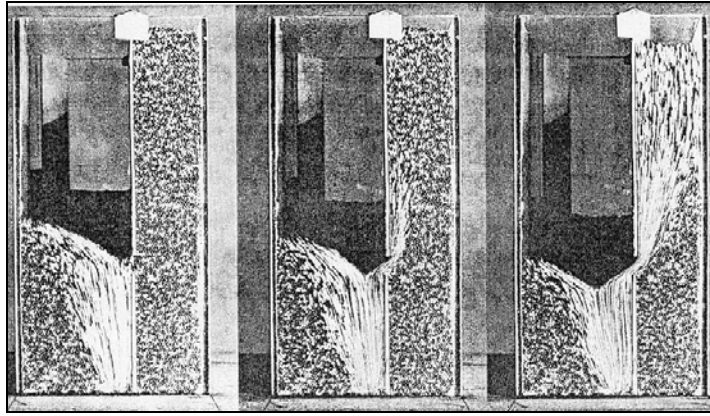


Rys.3.33 Model z przegrodami do badań przepływów [34]

Autor skupił się na wyznaczeniu krytycznych parametrów otworów, zapewniających prawidłowe działanie przewodu odciążającego. W celu uniknięcia dostawania się materiału do wnętrza przewodu przez otwory w dolnych partiach podczas przepływu materiału z górnych partii komory należy odpowiednio dobrać parametry otworu. Obraz przepływu, uzyskany dla środkowej przegrody i przejście z 1-szej do 2-giej fazy przedstawiono na rys. 3.34.

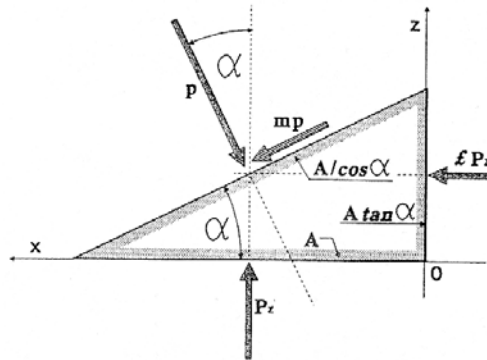
3.34. Autor przeanalizował trzy hipotezy stanu równowagi w pobliżu otworu w przegrodzie:

- równanie równowagi elementarnego przekroju ukośnego materiału sypkiego,
- maksymalna skuteczność mechanizmu utworzonego z dwóch klinów materiału sypkiego z tarciami pomiędzy nimi,
- skuteczność opróżniania w przypadku obciążenia parciem pionowym.



Rys. 3.34 Opróżnianie komory z przegrodą przez otwór środkowy[34]

W pierwszym przypadku rozpatrywany jest wydzielony element (rys. 3.35).



Rys. 3.35 Równowaga elementarnego odcinka materiału [34]

Równania równowagi przybiorą postać:

$$p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha + m \cdot p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha = P_z \cdot A \quad (3.50)$$

$$p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha + m \cdot p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha = k \cdot P_z \cdot A \cdot \tan \alpha, \quad (3.51)$$

gdzie: k – iloraz naporu poziomego i pionowego,

m – bieżący współczynnik tarcia.

Po uporządkowaniu wzory przyjmą postać:

$$p \cdot (1 + m \cdot \tan \alpha) = P_z \quad (3.52)$$

$$p \cdot (\tan \alpha - m) = k \cdot P_z \cdot \tan \alpha. \quad (3.53)$$

Bieżący współczynnik tarcia obliczony z równania (3.51), po przyjęciu $t = \tan \alpha$, wynosi:

$$m = (1 - k) \cdot \frac{t}{1 + k \cdot t^2}. \quad (3.54)$$

Wartość m zależy od wartości $t = \tan \alpha$. Maksymalny zaś współczynnik tarcia wyraża się stałą materiałową $m = \tan \delta$, gdzie: δ - kąt tarcia wewnętrzznego. Zachodzi zatem $m \leq \mu$. W chwili, gdy $m = \mu$, nastąpi poślizg warstwy. Przyrównując pochodną wyrażenia (3.54) do zera, otrzymuje się:

$$t^* = \frac{I}{\sqrt{k}}. \quad (3.55)$$

Podstawiając zaś wyrażenie (3.55) do (3.54) otrzymuje się maksymalną wartość μ :

$$\mu = \frac{I - k}{2\sqrt{k}}, \quad (3.56)$$

co z kolei po rozwiązaniu daje wyrażenia na iloraz naporu:

$$k_1 = \frac{I - \sin \delta}{I + \sin \delta}, \text{ dla przypadku, kiedy } P_z \text{ jest naporem czynnym}, \quad (3.57)$$

oraz

$$k_2 = \frac{I + \sin \delta}{I - \sin \delta}, \text{ dla przypadku, kiedy } P_x \text{ jest naporem biernym}. \quad (3.58)$$

Odpowiadające tym ilorazom nachylenia płaszczyzny poślizgu wynoszą odpowiednio:

$$t^*_1 = \sqrt{\frac{I + \sin \delta}{I - \sin \delta}}, \quad (3.59)$$

oraz

$$t^*_2 = \sqrt{\frac{I - \sin \delta}{I + \sin \delta}}. \quad (3.60)$$

Hipoteza maksymalnej skuteczności mechanizmu utworzonego z dwóch klinów (rys. 3.36) prowadzi do identycznych wartości t^*_1 i t^*_2 .

Współczynnik Π wyznaczony na podstawie bilansu sił i przemieszczeń, przy przyjęciu $t = \tan \alpha$, ma postać:

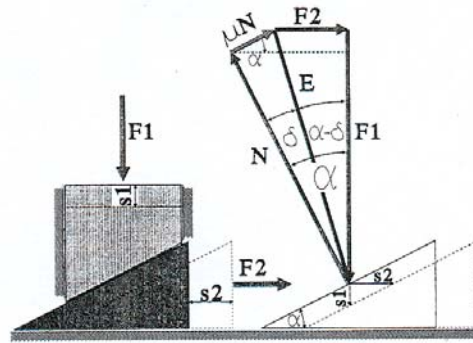
$$\Pi = \frac{F_2 \cdot s_2}{F_1 \cdot s_1} = \frac{N \cdot \sin \alpha - N \cdot \mu \cdot \cos \alpha}{N \cdot \cos \alpha + N \cdot \mu \cdot \sin \alpha} \cdot \frac{s_1}{s_1 \cdot \tan \alpha} = \frac{t - \mu}{t + \mu t^2}. \quad (3.61)$$

Poszukując maksymalnej wartości wyrażenia (3.61) otrzymuje się:

$$t^*_1 = \sqrt{\frac{I + \sin \delta}{I - \sin \delta}}, \quad (3.62)$$

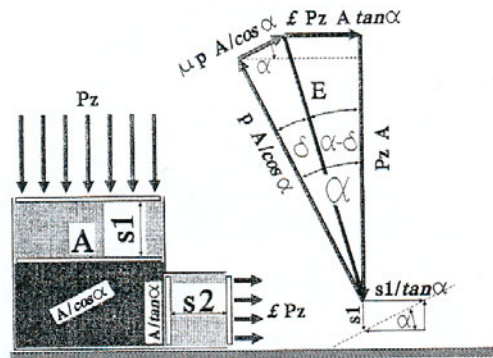
oraz

$$t^*_2 = \sqrt{\frac{I - \sin \delta}{I + \sin \delta}}. \quad (3.63)$$



Rys.3.36 Równowaga sił w modelu dwóch klinów [34]

Hipoteza trzecia, zobrazowana na rysunku 3.37, opiera się również na bilansie sił i przemieszczeń.



Rys. 3.37 Zobrazowanie hipotezy naporu biernego i czynnego [34]

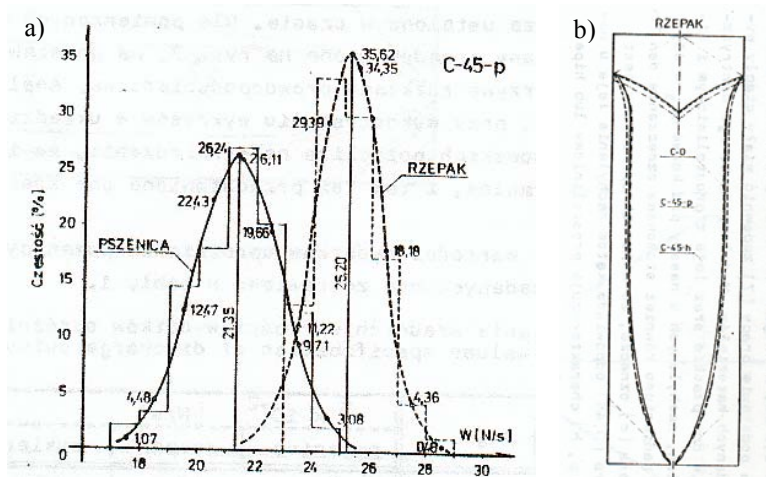
Wartość współczynnika Π wyraża się wzorem:

$$\Pi = \frac{F_2 \cdot s_2}{F_1 \cdot s_1} = \frac{\left[p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \sin \alpha - \mu \cdot p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha \right] \cdot \frac{s_1}{s_1 \cdot \tan \alpha}}{\left[p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cos \alpha - \mu \cdot p \cdot \frac{A}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha \right] \cdot s_1}, \quad (3.64)$$

co prowadzi do identycznych wyników jak w przypadku dwóch poprzednich hipotez.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że charakter przepływu w pobliżu otworu podobny jest do pionowego przepływu wewnętrznego, w takim bowiem przepływie najmniejsze są siły tarcia i napór wewnątrz ośrodka. Ponadto siły tarcia pomiędzy ściankami przewodu odciążającego a materiałem są mniejsze niż wewnątrz ośrodka. Nie istnieje zatem możliwość ruchu w strefach niższych, pod otworem bocznym (rys. 3.34), gdzie wartości naporów i sił tarcia są większe.

Rybiański [60, 61] w modelu badał cukier, pszenicę i rzepak. Obserwowano przepływ, ze zwróceniem uwagi na jego rodzaj, ustalono granice rdzeni przepływów i wydatek opróżniania. Krzywe rozkładów częstości sporządzone dla wydatku opróżniania pszenicy i rzepaku przedstawiono na rysunku 3.38.



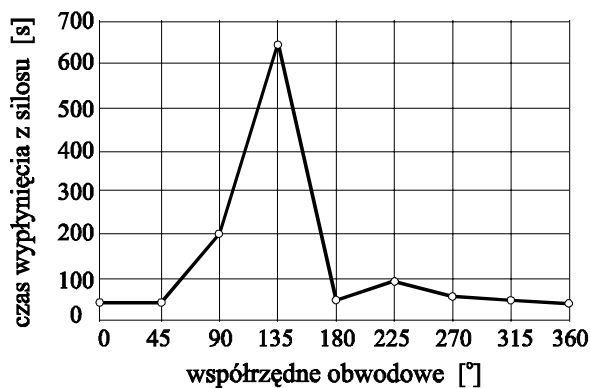
Rys. 3.38 Wyniki badań Rybiańskiego [60]; krzywe rozkładu częstości wartości wydatku opróżniania (a), kształt wtórnego rdzenia przepływu dla rzepaku (b)

Z wykresów wynika, że rozkłady wartości wydatków mają charakter normalny.

Na podstawie badań stwierdzono, że zastosowanie leja o profilu hiperboli zwiększa wydatek opróżniania. Wartość wydatku opróżniania zależy nie tylko od rodzaju materiału ale również od kształtu dna. Granice wtórnego rdzenia przepływu zależą przede wszystkim od rodzaju materiału, a nie od geometrii dna zbiornika.

Badania przepływu w silosie naturalnych rozmiarów na gips wykonali Ooi i in. [50, 51]. Interesująca metoda badawcza polegająca na zastosowaniu tzw. markerów radiowych pozwoliła na dokładne określenie położenia poszczególnych cząstek wewnątrz ośrodka sypkiego. W czasie warstwowego zasypywania komory o pojemności ok. 250 ton rozmieszczono równomiernie w materiale za pomocą matrycy markery, emitujące fale radiowe, w ilości do 300 sztuk. Dzięki pomocy urządzeń odbiorczych możliwe było śledzenie położenia poszczególnych markerów i precyzyjna ich lokalizacja. Również przejście markera przez otwór wysypowy było rejestrowane. Autorzy przeprowadzili serię czterech eksperymentów dla różnych konfiguracji urządzeń wspomagających wysyp (stożki) i przy włączonej i wyłączonej aeracji. Efektem badań było określenie dla każdego markera przedziału czasu, w jakim znajduje się on w komorze, od momentu otwarcia otworu wysypowego.

Z ciekawszych obserwacji należy przytoczyć zachowanie się markerów umieszczonych w dolnej części komory pomiędzy stożkiem a ścianą nachylonego leja wysypowego. Niektóre z nich opuściły komorę po 28 a niektóre po 642 sek. (rys. 3.39).



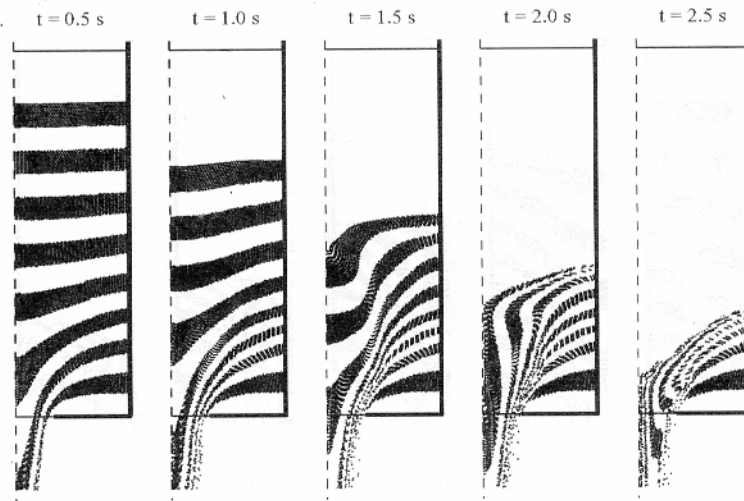
Rys.3.39 Rozkład czasu wypłynięcia markera na obwodzie [51]

Autorzy tłumaczą to zjawisko niesymetrycznym działaniem stożka. Wnioskują, że zwykle przyjmowana w założeniach symetria przepływu znacznie odbiega od ich wyników. W przypadku przepływów z użyciem wstawek uzyskali przepływ bardziej zbliżony do lejowego, a nie masowy, jak opisywany w literaturze.

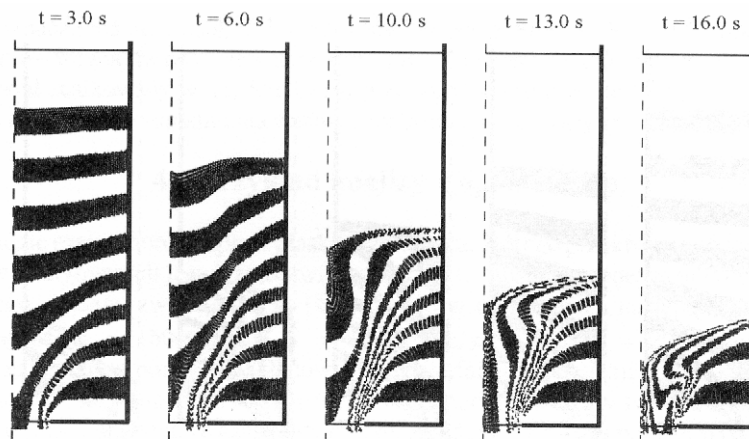
Elaskar i in. [10] podjęli próbę opisu zachowania materiału sypkiego w oparciu o związki konstytutywne. Zastosowali mechanikę cieczy nienewtonowskiej do opisu przepływu materiału sypkiego. Funkcję uplastycznienia i tensor naprężeń otrzymali wychodząc z tensora naprężeń, sformułowanego przez Savage'a. W wyniku rozwiązania równań konstytutywnych przy przyjęciu hipotezy stanu krytycznego otrzymali m.in. profil prędkości w nachylonym korycie. Założyli, że materiał sypki odkształca się tylko plastycznie. Wyniki analiz teoretycznych wykazują dużą zgodność z doświadczeniem. Zadanie rozwiązano w płaskim stanie.

Analizę procesu przepływu w zbiorniku z wykorzystaniem metody elementów skończonych przeprowadził Więckowski [75, 76]. Własności mechaniczne modelował przy użyciu koncepcji ciała sprężysto-lepkoplastycznego z warunkiem plastyczności Newtona-Pragera. Autor rozwiązał dwa rodzaje przepływu: swobodny i regulowany. Płaskie zadanie o wymiarach 120x200 cm podzielono na 5768 elementów i 3011 węzłów (5222 elementów – 2719 węzłów w przepływie regulowanym). Metoda elementów skończonych sformułowana w przestrzenno-materialnym opisie ruchu posiada zalety MES w ujęciu czysto przestrzennym i czysto materialnym. Proces obliczeń polega na śledzeniu zdefiniowanych punktów materialnych na tle nieruchomej siatki obliczeniowej.

Wynikiem analizy jest obraz przepływu w komorze z przepływem swobodnym (rys. 3.40) i przepływem regulowanym (rys. 3.41). W przypadku przepływu swobodnego otrzymano prędkość przepływu mniejszą niż obliczona z zależności Beverloo [3].



Rys. 3.40 Profil przepływu – wypływ swobodny według badań Więckowskiego [76]



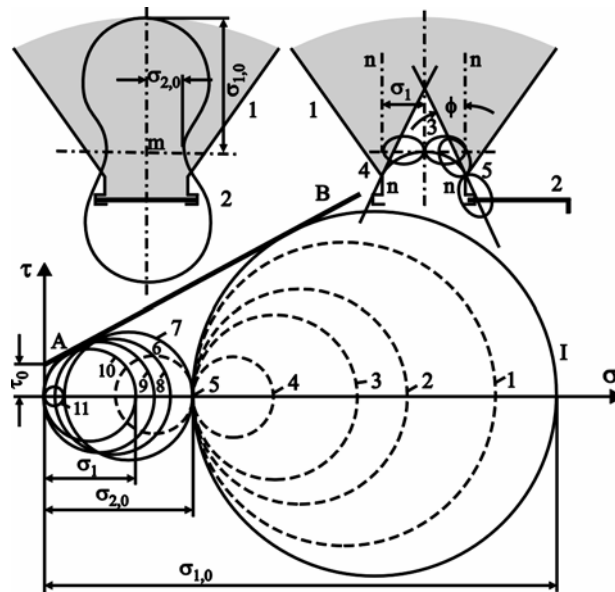
Rys. 3.41 Profil przepływu – wypływ regulowany według badań Więckowskiego [76]

Analizę stanu naprężeń w sklepieniu formującym się w materiale sypkim można znaleźć m.in. u Dreschera [8, 9] i u Malczewskiego [39, 40].

Analizując powstawanie sklepień nad otworami wysypowymi Malczewski wysnuł następujące wnioski - zmiany naprężeń w obszarze nad otworem wysypowym (rys. 3.42) po jego otwarciu i w przypadku formowania się sklepienia przebiegają w następującej kolejności:

- złożę podlega deformacjom sprężystym, zmniejszają się naprężenia główne (koła 1-5) i następnie, aż do zrównania się naprężeń pionowych z poziomymi,

- pionowe naprężenia, mniejsze już od poziomych, spadają aż do zera, złoże odkształca się plastycznie,
- gdy koło przyjmuje położenie 10, znikną naprężenia normalne i powstaną warunki sprzyjające utworzeniu się sklepienia,
- rozwijają się naprężenia styczne skierowane do góry, w płaszczyznach pionowych $n-n$; jeśli ich wypadkowa wokół warstwy położonej nad otworem zrównoważy siły pionowe w dół, to sklepienie staje się stateczne.



Rys. 3.42 Zmiany naprężeń w obszarze nad otworem wysypowym [38]

Linia określająca kształt sklepienia leży na powierzchni swobodnej ciała i dlatego wszystkie normalne do niej naprężenia są równe zero (koło 10). W miarę przebiegu deformacji plastycznych graniczne koło dla punktu środkowego m zmniejsza się z koła 10 na 11. Głównym zatem problemem jest określenie granicznej wielkości otworu, przy której mogą się jeszcze tworzyć sklepienia.

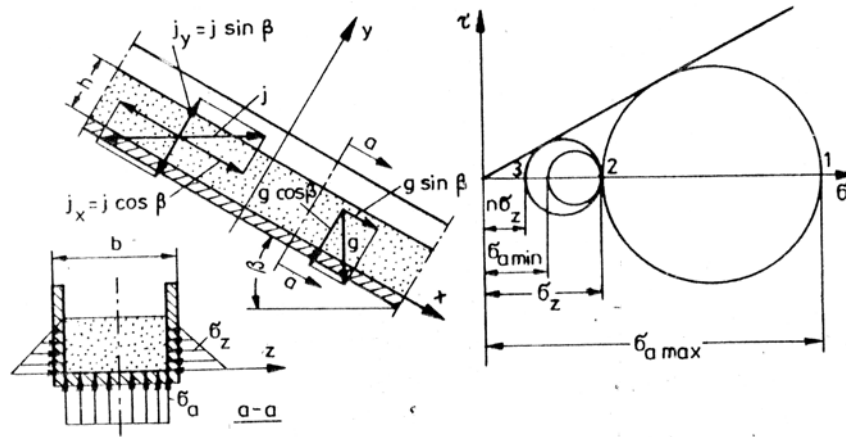
Malczewski przeprowadził też dokładną analizę teoretyczną przepływu nachylonym korytem [39]. Charakterystyczną cechą takiego ruchu jest to, że siły tarcia o ściany i dno koryta są skierowane równoległe do jego osi podłużnej i mają zwrot przeciwny do kierunku ruchu ciała. Graniczna wartość naprężeń stycznych w płaszczyznach zetknięcia się materiału sypkiego z dnem jest określona wzorem:

$$\tau = f_l \cdot \sigma, \quad (3.65)$$

gdzie: f_l – współczynnik tarcia materiału o ściankę koryta,

σ – naprężenia normalne.

Rozpatrując siły działające na materiał przemieszczający się w korycie (rys. 3.43), przyjmuje się dla uproszczenia, że siły normalne i styczne działające na powierzchniach poszczególnych przekrojów poprzecznych różnią się od siebie o wartości pomijalnie małe.



Rys. 3.43 Siły działające na materiał sypki w nachylonym korycie [39]

Ogólne równania równowagi przyjmują postać:

$$\Sigma F_x + \Sigma S_x + \Sigma T_x = 0, \quad (3.66)$$

$$\Sigma F_y + \Sigma S_y + \Sigma T_y = 0, \quad (3.67)$$

$$\Sigma F_z + \Sigma S_z + \Sigma T_z = 0, \quad (3.68)$$

$$M_x + M_y + M_z = 0, \quad (3.69)$$

gdzie: F_x, F_y, F_z – rzuty na osie współrzędnych x, y, z sił objętościowych działających na ciało sypkie,

S_x, S_y, S_z – rzuty sił normalnych działających na powierzchnię ciała sypkiego,

T_x, T_y, T_z – rzuty sił stycznych działających na powierzchnię ciała sypkiego,

M_x, M_y, M_z – rzuty momentów wymienionych sił względem dowolnej osi.

Siły objętościowe działające w układzie określone są wzorami:

$$F_x = m(g \sin \beta + j_x), \quad (3.70)$$

$$F_y = m(g \cos \beta + j_y), \quad (3.71)$$

$$F_z = 0, \quad (3.72)$$

gdzie: m – masa elementu złoża sypkiego,

j – przyspieszenie, z jakim porusza się ciało sypkie.

$$\Sigma S_x + \Sigma T_x = -\Sigma S_f, \quad (3.73)$$

$$\sum S_y + \sum T_y = -\sum S, \quad (3.74)$$

$$\sum S_z + \sum T_z = 0. \quad (3.75)$$

Podstawiając wartości poszczególnych wyrażen do ogólnych równania (3.66-3.69) otrzymuje się:

$$mg \left(\sin \beta + \frac{j_w}{g} \right) - \sum S f_l = 0, \quad (3.76)$$

$$mg \left(\cos \beta + \frac{j_v}{g} \right) - \sum S = 0. \quad (3.77)$$

W korycie wypełnionym symetrycznie, siły objętościowe i powierzchniowe działające na materiał sypki nie wywołują momentów. Ciężar przemieszczającego się materiału, przypadający na jednostkę długości koryta, wynosi:

$$G = mg = bh\gamma_{us}, \quad (3.78)$$

gdzie: b – szerokość koryta,

h – średnia wysokość warstwy materiału w korycie,

γ_{us} – ciężar usypowy.

Powierzchnia dna koryta o szerokości b i długości równej jednostki wynosi b . Jeżeli przez σ_a oznaczy się średnie ciśnienie działające na dno koryta, to nacisk na nie na jednostce długości jest równy:

$$\sum S = b\sigma_a, \quad (3.79)$$

Wstawiając wartości $\sum S$ i G do równania (3.77) i rozwiązując je względem σ_a uzyskuje się związek:

$$\sigma_a = \frac{bh\gamma_{us} \left(\cos \beta + \frac{j_v}{g} \right)}{b} = h\gamma_{us} \left(\cos \beta + \frac{j_v}{g} \right). \quad (3.80)$$

Przyjmując, że ciśnienie na ścianki wzrasta proporcjonalnie do odległości rozpatrywanego punktu od powierzchni ciała sypkiego, można napisać:

$$\sum S f_l = \sigma_a (b + nh) f_l, \quad (3.81)$$

gdzie: $n = \sigma_b / \sigma_a$ – współczynnik parcia bocznego.

Po wstawieniu wyrażenia określającego $\sum S f_l$ do równania (3.76) otrzymuje się:

$$bh\gamma_{us} \left(\sin \beta + \frac{j_w}{g} \right) - f_l \sigma_a (b + nh) = 0, \quad (3.82)$$

a po podstawieniu do niego wzoru (3.80) dochodzi się do postaci:

$$\sin \beta + \frac{j_x}{g} - f_1 \left(\cos \beta + \frac{j_y}{g} \right) - \left(1 - \frac{nh}{b} \right) = 0. \quad (3.83)$$

Jeżeli przyjmie się, że początkowa prędkość materiału sypkiego znajdującego się w pochyłym korycie wynosi v_0 , końcowa prędkość przy zsypywaniu się z rynny v , a długość koryta l , to przyspieszenia można wyznaczyć z równania:

$$j = \frac{v^2 - v_0^2}{2l}. \quad (3.84)$$

Zakłada się, że $v > v_0$, zatem kierunek i zwrot wektora przyspieszenia jest zgodny z kierunkiem ruchu, natomiast jednostkowa siła bezwładności ciała sypkiego będzie miała zwrot przeciwny. Ponieważ $j_y = 0$, więc $j_x = j$. Jednostkowa siła bezwładności wyniesie więc:

$$-mj = m \left(\frac{v_0^2 - v^2}{2l} \right). \quad (3.85)$$

Wzór (3.83) przyjmie postać:

$$\sin \beta + \frac{v_0^2 - v^2}{2gl} - f_1 \cos \beta \left(1 + \frac{nh}{b} \right) = 0. \quad (3.86)$$

Rozwiązując zaś powyższe równanie względem v otrzymuje się związek określający prędkość ruchu materiału sypkiego w pochyłym korycie:

$$v = \sqrt{2gl \left[\sin \beta - f_1 \cos \beta \left(1 + \frac{nh}{b} \right) \right] + v_0^2}. \quad (3.87)$$

Wartość współczynnika parcia bocznego zależy od własności mechanicznych i stopnia zagęszczenia ciała sypkiego, gładkości ścian koryta i in. Wzór (3.87) można również zapisać w postaci:

$$v = \sqrt{2gl(\sin \beta - f_1 \varepsilon \cos \beta) + v_0^2}, \quad (3.88)$$

gdzie:

$$\varepsilon = 1 + \frac{nh}{b}. \quad (3.89)$$

Przyjmuje się, że:

$$n_{min} = \frac{l}{1 + \sin \varphi}. \quad (3.90)$$

gdzie: φ – kąt tarcia wewnętrzznego.

Przy małych prędkościach ruchu materiału w korycie przyjmuje się, że współczynnik boczno-parcia n jest bliski zera.

Przyrównując przyspieszenie we wzorze (3.86) do zera można wyznaczyć kąt nachylenia koryta, przy którym prędkość ruchu materiału sypkiego przyjmie stałą wartość

$$\operatorname{tg} \beta = f_l \left(1 + \frac{nh}{b} \right). \quad (3.91)$$

Wzór ten określa również najmniejszą wartość kąta nachylenia koryta dla materiałów sypkich, wsypywanych do koryta z prędkością bliską zera, wsypywanych do koryta z prędkością bliską zera, zapewniając samoczynne zsypywanie się materiału.

W tabelicy 3.3 zestawiono przykładowe, wyznaczone doświadczalnie najmniejsze wartości kąta β , przy którym występuje samoczynne przemieszczenie się materiału.

Tablica 3.3 Najmniejsze wartości kąta nachylenia koryta β o przekroju prostokątnym dla różnych materiałów [39]

Rodzaj materiału sypkiego	Materiał powierzchni roboczej koryta	Kąt nachylenia koryta β
pszenica	stal	26
jęczmień	stal	20÷21
owies	stal	21÷22
owies	drewno	24
proso	stal	21÷22
proso	drewno	25

Przy znacznej długości nachylonego koryta i małym współczynniku tarcia mogą wystąpić prędkości materiału przekraczające 2÷3 m/s. Należy wówczas uwzględnić opór aerodynamiczny płynącej strugi.

Jeśli długość koryta zwiększa się, v rośnie, początkowo szybko, następnie wolniej, aby po przekroczeniu określonej długości koryta przyjąć stałą wartość. Graniczną wartość dla $l \rightarrow \infty$ prędkości można określić ze wzoru:

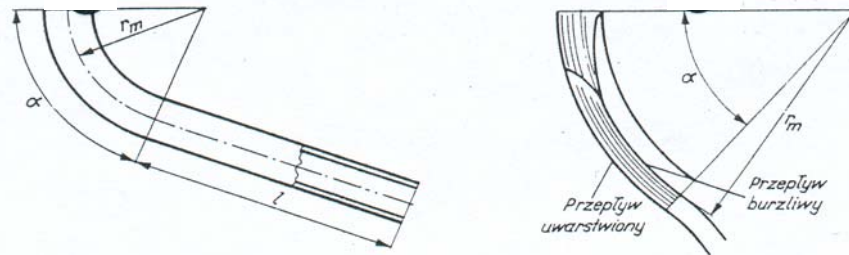
$$v_{gr} = \sqrt{\frac{g \left[\sin \beta - f_l \left(1 + \frac{nh}{b} \right) \cos \beta \right]}{k_l}}, \quad (3.92)$$

gdzie: k_l – współczynnik lotności, którego przykładowe wartości zebrano w tabelicy 3.4.

Tablica 3.4 Wartości współczynnika lotności [39]

Rodzaj nasion	k_f
pszenica	0,076÷0,121
jęczmień	0,084÷0,138
owies	0,018÷0,150
proso	0,070÷0,101
soja	0,024÷0,033
żyto	0,100÷0,140

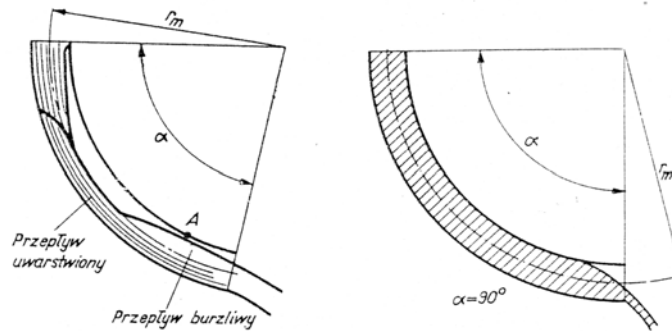
Analizę zachowania się materiału sypkiego w rurach spadowych podaje Dmitrewski [7]. Stwierdzono, że w stosowanych w praktyce układach rur spadowych (rys.3.44a), składających się z części wlotowej w postaci kolana, będącego wycinkiem łuku kołowego oraz części wylotowej w postaci kolana, charakter przepływu zależy od wartości kąta środkowego α (rys. 3.44b).



Rys. 3.44 Układ rur spadowych (a) i przepływ szybki w krótkim kolanie (b) [7]

Na podstawie poczynionych obserwacji rozróżniono dwa rodzaje przepływu: przepływ szybki oraz przepływ powolny. Charakterystyczną cechą przepływu szybkiego jest istnienie ciągłego strumienia materiału sypkiego, wypełniającego tylko część przekroju przewodu (rys. 3.43b). Ruch materiału w pobliżu dolnej ścianki przewodu ma charakter uwarstwiony (laminarny), a tylko w pobliżu swobodnej powierzchni materiału sypkiego przypomina przepływ burzliwy, dzięki występującym przypadkowym przemieszczeniom w różnych kierunkach. Ze zwiększaniem kąta α , a tym samym zwiększeniem długości krzywoliniowego odcinka przewodu, warunki przepływu w pobliżu wlotu pozostają niezmiennione, natomiast w pobliżu wylotu z kolana grubość warstwy wyraźnie wzrasta, przy czym przepływ w dodatkowej warstwie ma charakter burzliwy. Przy dalszym wzroście kąta α i wydłużeniu krzywoliniowego odcinka przewodu warstwa materiału tak wzrasta, że w punkcie A (rys. 3.45a) materiał prawie całkowicie wypełnia przekrój. W krótkim czasie cały krzywoliniowy odcinek rury zostaje wypełniony materiałem sypkim, a ruch materiału nabiera

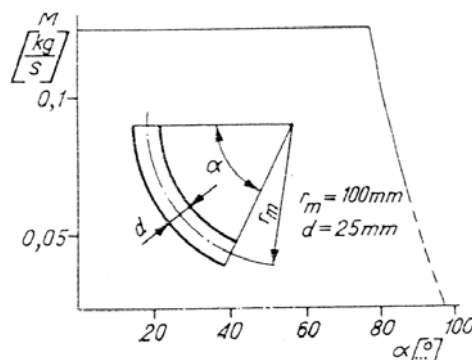
innego charakteru, przechodząc w przepływ powolny. Wysypywanie się materiału zostaje zredukowane do cienkiej strugi (rys.3.45b).



Rys. 3.45 Wpływ wydłużenia kolana rurowego na charakter przepływu (a) i przepływ całym przekrojem rury (b) [7]

W badaniach nad wysypywaniem się nasion rzepaku stwierdzono, że przy zwiększaniu kąta α pierwsze zgrubienie strugi materiału występuje dla kąta środkowego $\alpha = 60 \div 80^\circ$. Odpowiednio kąt graniczny zmiany przepływu z szybkiego na powolny wynosi $\alpha_{sp} = 75 \div 85^\circ$. Wartość kąta α_{sp} zależy od przekroju oraz od promienia krzywizny przewodu. Zmniejszając natomiast kąt od wartości maksymalnej wynoszącej 90° stwierdzono z kolei, że ponowna zmiana charakteru ruchu i przejście od przepływu powolnego do szybkiego występuje przy pewnym kącie α_{ps} , który jest zwykle nieco mniejszy od kąta α_{sp} (dla rzepaku wyniósł $68 \div 80^\circ$).

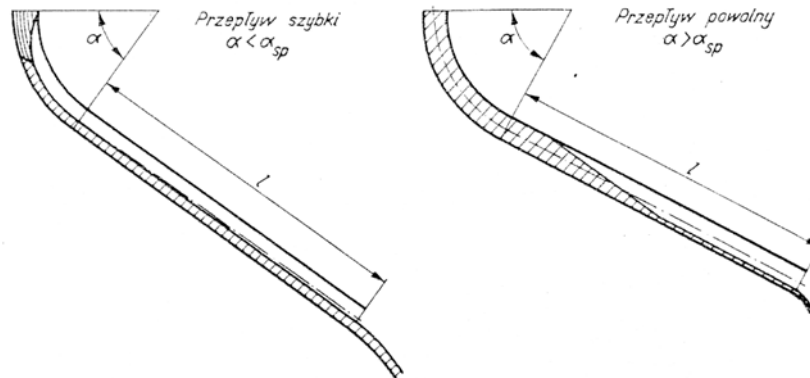
Na rysunku 3.46 przedstawiony jest wykres obrazujący zmianę wydatku materiału M przy przepływie przez kolano o przekroju kwadratowym w zależności od kąta α .



Rys.3.46 Wykres zmiany wydatku rzepaku w korycie w zależności od kąta środkowego kolana

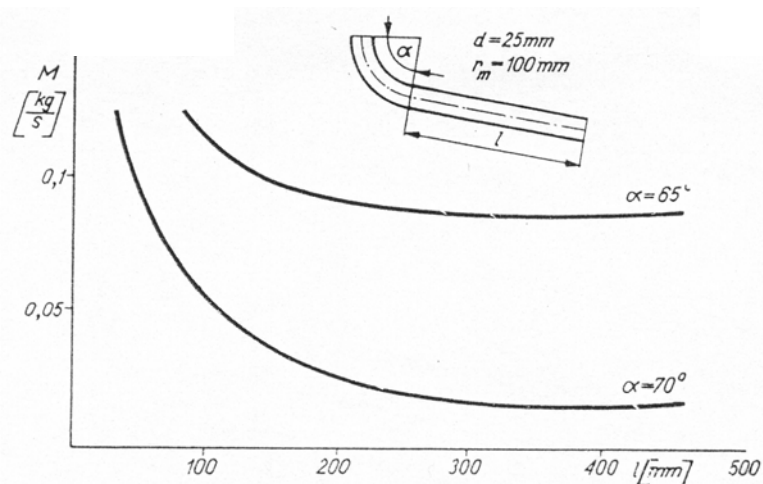
Z wykresu można wysnuć wniosek, że w zakresie przepływu szybkiego dla kątów α mniejszych od kąta granicznego wydatek ten jest stały i niezależny od kąta α . Po osiągnięciu

zaś kąta granicznego gwałtownie spada, malejąc przy kacie bliskim $\alpha = 100^\circ$ do zera. Charakter przepływu zależy również od długości prostoliniowego odcinka wylotowego. Przy przepływie szybkim przekrój strugi w prostym odcinku wylotowym o niewielkiej długości jest stały, natomiast przy przepływie powolnym grubość strumienia początkowo się zwęża, a następnie po osiągnięciu określonej wartości ustala się (rys. 3.47).



Rys. 3.47 Zwężenie strugi materiału sypkiego przy przepływie w długim nachylonym rurociągu

Zwiększenie długości odcinka wylotowego i związany z tym wzrost oporów przepływu wpływa w podobny sposób, jak zwiększenie kąta α , tzn., że po przekroczeniu pewnej długości odcinka wylotowego wydatek zacznie się zmniejszać. Na rysunku 3.48 przedstawiona jest zależność wydatku M w funkcji długości prostoliniowego odcinka wylotowego rury dla kątów α wynoszących 65° i 70° (przepływ szybki).

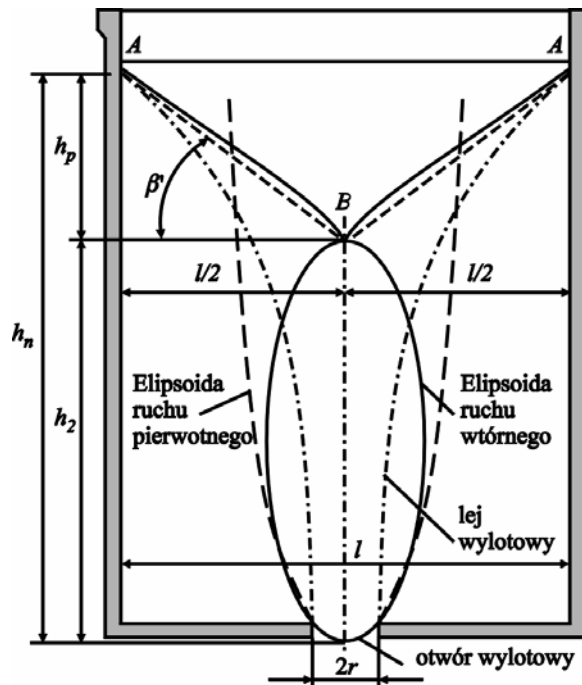


Rys. 3.48 Wykres zmiany wydatku w zależności od długości prostoliniowego odcinka wylotowego

Z rysunku wynika, że po przekroczeniu pewnej długości odcinka prostoliniowego wydatek praktycznie pozostaje stały na dalszym odcinku rury stały. Prędkości poszczególnych warstw

materiału sypkiego w przekroju nachylonego przewodu są różne. Warstwy przyścienne wskutek hamującego oddziaływania ścian przewodu poruszają się najwolniej. Warstwy leżące w większej odległości od ścian przewodu poruszają się równoległe do nich (ruch laminarny). W dostatecznie dużej odległości od ścian, wewnątrz warstwy materiału, a w szczególności w pobliżu swobodnej powierzchni szybko poruszającego się strumienia, występują bezładne przemieszczenia cząstek w poprzek do głównego kierunku strumienia, charakterystyczne dla ruchu burzliwego.

Kvapil [38] w szerokim zakresie badał cechy przepływu w zbiorniku wypełnionym materiałem sypkim. Według niego poruszające się cząstki tworzą elipsoidy obrotowe (rys. 3.49).



Rys. 3.49 Elipsoida obrotowa według badań Kvapila [38]

Na podstawie poczynionych obserwacji Kvapil stwierdził, że wymiary elipsoid zależą od wymiarów cząstek, im mniejsze cząstki tym elipsoidy są bardziej wydłużone. Znalazł też zależność pomiędzy objętością elipsoid wtórnej i pierwotnej, wyrażoną wzorem:

$$V_1 = 15V_2, \quad (3.93)$$

gdzie: V_1 – objętość elipsoidy ruchu pierwotnego,

V_2 – objętość elipsoidy ruchu wtórnego.

Współczynnik ruchliwości jest równy stosunkowi wartości obu naprężeń głównych:

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad (3.94)$$

co po odpowiednich przekształceniach prowadzi do zależności:

$$m = 1 - \frac{2\mu_w \sqrt{1 + \mu_w^2}}{1 + \mu_w \sqrt{1 + \mu_w^2} + \mu_w^2}, \quad (3.95)$$

gdzie: μ_w – współczynnik tarcia wewnętrznego.

Dla spotykanych w praktyce materiałów współczynnik tarcia wewnętrznego wynosi w granicach $0,4 \div 1,2$, wynika stąd uproszczony wzór na współczynnik ruchliwości:

$$m = \frac{0,18}{\mu_w}, \quad (3.96)$$

Szybkość materiału sypkiego w otworze wylotowym będzie zależna od jego współczynnika ruchliwości i ciśnienia wywieranego przez słup materiału sypkiego nad płaszczyzną otworu.

Według Kvapila słup ten ma wysokość równą wysokości elipsoidy ruchu wtórnego.

Całkowite parcie pionowe w płaszczyźnie otworu wynosi według Kvapila:

$$P = h_2 \gamma F \left(1 - \frac{\mu_w dh_2 m}{2F} \right), \quad (3.97)$$

gdzie: h_2 – wysokość słupa materiału lub elipsoidy ruchu wtórnego [m],

γ – ciężar usypowy materiału [N/m^3],

F – powierzchnia przekroju otworu wylotowego [m^2],

μ_w – współczynnik tarcia wewnętrznego materiału,

m – współczynnik ruchliwości.

Występującą we wzorze wysokość h_2 można obliczyć ze wzoru:

$$h_2 = h_n - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \varphi_w, \quad (3.98)$$

gdzie: h_n – całkowita wysokość słupa materiału w zbiorniku,

D – średnica zbiornika,

φ_w – kąt tarcia wewnętrznego.

Ciśnienie w otworze wylotowym wyniesie

$$p_v = \frac{P}{F}. \quad (3.99)$$

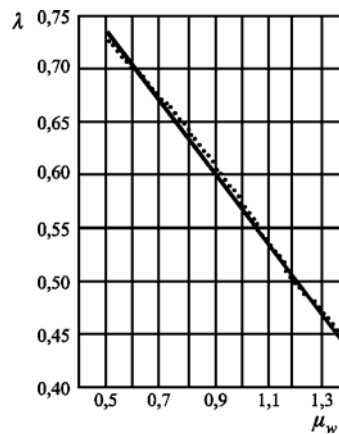
Stąd analogicznie do wzoru na prędkość wypływu cieczy, można napisać wzór na prędkość wysypywania się materiału sypkiego:

$$v = \lambda \sqrt{2g \frac{P_v}{\gamma}}. \quad (3.100)$$

We wzorze tym λ oznacza współczynnik określający wpływ tarcia wewnętrznego na prędkość wysypywania się materiału. Według Kvapila wartość tego współczynnika można określać ze wzoru:

$$\lambda = \frac{I}{\sqrt{2\mu_w \left(\frac{I}{\mu_w} + 2\mu_w \right) - \sqrt{I + \mu_w^2}}}. \quad (3.101)$$

Na rysunku 3.50 przedstawiono wykres obrazujący przebieg współczynnika λ w funkcji współczynnika tarcia wewnętrznego μ_w .



Rys. 3.50 Wykres współczynnika λ w funkcji współczynnika tarcia wewnętrznego według badań Kvapila [38]

Minimalna powierzchnia otworu wylotowego, przy której następuje jeszcze wysypywanie się materiału jest zależna od wielkości cząstek d_z . Według Kvapila powierzchnia ta jest równa:

$$F_{min} = Kn(5d_z)^2, \quad (3.102)$$

gdzie: K – określany doświadczalnie współczynnik wypływu ($K = 1,4$),

n – współczynnik kształtu otworu (dla otworów kwadratowych $n = 1$, dla otworów okrągłych $n = 0,85$).

d_z – średni wymiar cząstki materiału.

Analizując wyniki badań, Kvapil określił natężenie strumienia materiału (w kg/s) wysypującego się przez otwór w zbiorniku z płaskim dnem:

$$M_0 = vF' \rho_s = \lambda \rho_s F' \sqrt{2g \frac{P_v}{\gamma}}, \quad (3.103)$$

gdzie: λ – współczynnik zwężenia strugi (zmniejszenia prędkości wysypywania się),

ρ_s – masa usypowa materiału sypkiego [kg/m^3],

d_z – rzeczywista powierzchnia przekroju otworu wylotowego [m^2],

d_z – ciśnienie słupa materiału sypkiego nad otworem [Pa].

Dla zbiorników, których wysokość zasypu jest znacznie większa od wartości promienia hydraulicznego, można wykorzystać zależność:

$$p_v = \frac{\gamma d'}{4k\mu_l} \left[1 - e^{\left(\frac{-4k\mu_l h}{d'} \right)} \right], \quad (3.104)$$

gdzie: d' – rzeczywista średnica strumienia materiału, skąd po przyjęciu $k_l = 4k$ oraz koniecznych przekształceniach można wyznaczyć zależność na natężenie strumienia przepływu.

$$M_0 = \lambda \pi \sqrt{\frac{g}{8k_l \mu_l}} \rho_s d'^{2,5}, \quad (3.105)$$

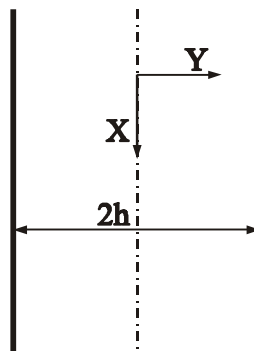
gdzie: μ_l – współczynnik tarcia materiału o ścianę.

Rzeczywista średnica strumienia materiału jest mniejsza od średnicy otworu wylotowego:

$$d' = d - \delta, \quad (3.106)$$

gdzie: δ – zależy od wielkości cząstek i według doświadczeń wynosi $\delta = 1,5-3d_z$.

Niektóre modele teoretyczne przepływu, spotykane w literaturze mają zastosowanie do materiałów luźnych, inne do szybko płynących, itd. W pracy [79] omawiane są te zagadnienia w odniesieniu do przepływu materiału w dół pionowego kanału. Model tam zawarty został stworzony w celu jakościowego wyobrażenia wielu cech obserwowanych przy przepływie materiału. Geometrię kanału przedstawiono na rysunku 3.51.



Rys. 3.51 Geometria kanału z przyjętymi oznaczeniami według pracy [79]

Autorzy przedstawili tok rozumowania przy wyprowadzaniu równań konstytutywnych dla swojego modelu, a także wyniki symulacji przeprowadzonej przy użyciu metody „gazu siatkowego”. Przy założeniu, że stan naprężenia wg Cauchy’ego wyraża się wzorem:

$$T = \{\beta_0(v) + \beta_1(v) \nabla v + \beta_2(v) \text{tr} D\} \mathbf{I} + \beta_3(v) D + \beta_4(v) \nabla v \otimes \nabla v, \quad (3.107)$$

gdzie: v – współczynnik wielkości cząstek,

D – tensor rozciągany skojarzony z ruchem cząstek,

\mathbf{I} – tensor tożsamości.

Współczynniki β odpowiadają parametrom materiałowym, odpowiednio:

$\beta_0(v)$ – ciśnienie ściśliwej cieczy,

$\beta_2(v)$ – drugi współczynnik lepkości ściśliwej cieczy,

$\beta_3(v)$ – lepkość materiału sypkiego,

$\beta_1(v), \beta_4(v)$ – parametry odzwierciedlające rozkład materiału sypkiego.

Zazwyczaj parametry te są funkcjami wielkości ziaren, temperatury i głównych niezmienników tensora rozciągania D , który ma postać:

$$D = [(\nabla u) + (\nabla u)^T], \quad (3.108)$$

gdzie u jest prędkością ziaren.

Współczynnik zagęszczenia v zależy od gęstości materiału ρ według relacji:

$$\rho = \gamma \cdot v \quad (3.109)$$

gdzie γ oznacza cząstkę lub gęstość ziaren w miejscu x i czasie y .

Po odpowiednich założeniach np. $v = v(y)$ i $u = u(y)$, autorzy rozpatrują dwa przypadki:

a) $\beta_1, \beta_2, \beta_4$ są stałe, oraz

b) $\beta_1, \beta_2, \beta_4$ są proporcjonalne do kwadratu współczynnika zagęszczenia materiału.

Dla obu przypadków β_0 i β_3 są w przybliżeniu równe: $\beta_0 = k \cdot v$, $\beta_3 = \beta_3(v + v^2)$.

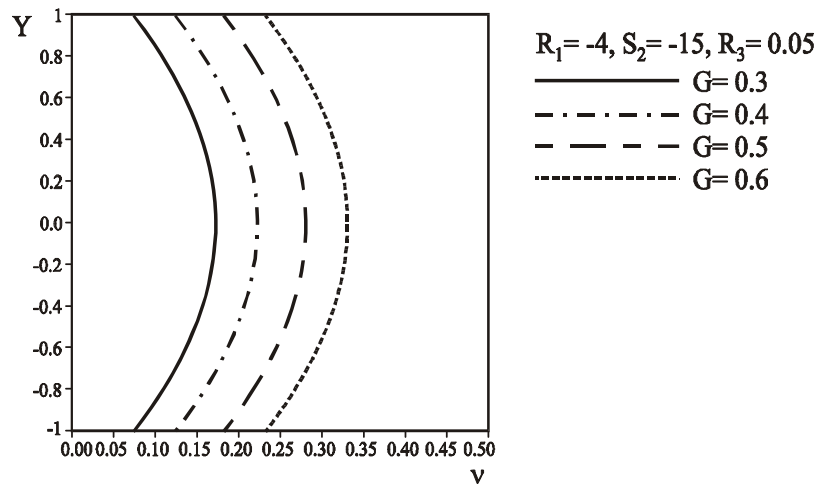
Przypadek a można rozwiązać analitycznie, a przypadek b numerycznie. Dla przypadku a otrzymuje się rozwiązanie:

$$v = \frac{I}{15BR_3} (-1,667B + 10A - 5) \ln \left(\frac{5000By^{-2} - 1667B + 10000A + 10000}{3333B + 10000A + 10000} \right) + \\ - (10A - 1,667B) \ln \left(\frac{5000By^{-2} - 1667B + 10000A + 10000}{3333B + 10000A} \right) \quad (3.110)$$

$$\text{gdzie: } A = \frac{G}{2}, \quad G = \int_{-l}^l v dy, \quad B = \frac{-R_1}{R_2}. \quad (3.111-3.113)$$

Rozwiązanie numeryczne dla przypadku b autorzy otrzymali za pomocą stosując generację siatki opartą na estymacji błędu. Odnosząc wyniki swoich symulacji do wyników doświadczalnych Savage'a stwierdzili dobrą zgodność. Stwierdzili również, że niezależnie od wartości $R_1 = k/\gamma \cdot g \cdot h$ współczynnik zagęszczenia v osiąga maksimum przy ścianie, a

minimum w środku kanału. Wartość bezwzględna zmian współczynnika ν wzrasta, gdy maleje R_1 . R_1 jest ilorazem ciśnienia (naporu pionowego) do siły ciężkości materiału, zatem spadek wartości R_1 można tłumaczyć wzrostem naporu. Zauważono również, że spadek wartości R_1 powoduje wzrost prędkości w kanale oraz, że rozkład wykresu prędkości nie jest paraboliczny, co wskazuje na przepływ masowy. Stwierdzono również, że wzrost wartości $R_3 = b_3 \cdot U_0 / 2 \cdot \gamma \cdot g \cdot h^2$ powoduje spadek prędkości cząstek (U_0 – prędkość maksymalna). Współczynnik R_3 jest ilorazem sił lepkości do siły grawitacji. Równania opisujące współczynnik zagęszczenia nie zawierają parametru R_3 , stąd zmiany R_3 nie wpływają na współczynnik zagęszczenia. Jak można było przewidzieć, wzrost wydatku powoduje spadek prędkości w kanale i wzrost współczynnika zagęszczenia materiału. Obrazuje to rysunek 3.52.



Rys. 3.52 Profil prędkości w pionowym kanale dla różnych wartości G [79]

Zagadnienie przepływu kanałem pionowym podjęto w pracy [13], ze szczególnym naciskiem na zużywanie się kanału wyrobiska do transportu materiałów gruboziarnistych o ostrych cząstkach. Stwierdzono ogólnie, że natężenie ścierania jest proporcjonalne do iloczynu $p_n \cdot v$, gdzie p_n – napór poziomy, v – prędkość cząstek. Wychodząc zaś z zależności Janssena [16] przy dostatecznie wydłużonym kanale o wysokości H , napór dąży do wartości:

$$p_n \rightarrow \frac{\gamma D \sin \beta}{4\mu}, \quad (3.114)$$

gdzie: γ – ciężar objętościowy materiału,

D – średnica przewodu,

β – kąt nachylenia kanału względem poziomu,

μ – współczynnik tarcia materiału o ścianę kanału.

Można zatem określić intensywność ścierania się warstw kanału w skali np. roku z zależności:

$$W_r = \frac{Q \sin \beta}{\mu \pi D}, \quad (3.115)$$

gdzie: Q – roczny wydatek materiału przepływającego przez kanał.

3.5 Krytyczne podsumowanie dotychczasowych badań silosów wyposażonych w urządzenia odciążające

Dokonując przeglądu literatury, który ze względu na szczupłość miejsca musiał być znacznie zredukowany, można stwierdzić, że zagadnienie przepływu materiału sypkiego w silosach było i jest przedmiotem intensywnych badań. Prace poświęcone tym zagadnieniom można podzielić na kilka grup. W pierwszej znajdują się te, które traktują o teoretycznych związkach rządzących przepływem materiału sypkiego, np. [8], [9], [14], [38], [39], [40], [46], [47], [48], [79]. Kolejną grupę stanowią prace, których celem jest określenie wytycznych projektowania przewodów odciążających i komór silosowych, biorące pod uwagę interakcję między ośrodkiem sypkim a elementami pogrążonymi w tym ośrodku, np. [13], [18], [25], [26], [29], [32], [42], [43], [51], [52], [53], [60], [70], [71]. Istotną część prac stanowią te, które opisują eksperymenty z wykorzystaniem metod numerycznych, opartych o algorytmy dynamiczne, automaty komórkowe, czy metody elementów skończonych takie jak: [1], [2], [11], [35], [36], [41], [75], [76].

Na podstawie przeglądu literatury można wyprowadzić następujące wnioski:

1. Istnieją pewne optymalne parametry geometryczne przewodów odciążających, zapewniające ich prawidłowe działanie.
2. Parametry optymalne przewodów obowiązują w pewnym niewielkim zakresie, wynikającym z podobieństwa modelowego i nie można ich uogólniać na szeroki wachlarz istniejących komór.
3. Poprawne działanie urządzeń odciążających potwierdzone dla przewodów zajmujących całą wysokość komory sprowadza się do wyeliminowania przyrostu naporu podczas opróżniania, zaś w przypadku przewodów niskich obszar redukcji naporu jest różny dla różnych badań.
4. We wszystkich badaniach eksperymentalnych odnotowano wpływ podatnego zawieszenia elementów w ośrodku sypkim na siły obciążające te elementy.

5. Wadliwie zaprojektowane urządzenia odciążające mają niekorzystny wpływ na wartości i rozkład obciążeń w silosach.
6. Brak w literaturze badań przewodów nachylonych, zajmujących dolną część komory silosu, zamocowanych sztywno w dnie – dotyczy to zarówno badań modelowych, jak i w skali naturalnej.
7. Obliczenia numeryczne nie dają wystarczająco dobrej zgodności z wynikami doświadczalnymi, a dodatkową przeszkodą w ich realizacji są trudności w ustaleniu parametrów materiałowych.
8. Symulacje numeryczne przepływów w komorach z występującymi w nich przeszkodami nie były przedmiotem badań.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski, skupiono się w niniejszej pracy na znalezieniu zależności pomiędzy parametrami geometrycznymi nachylonych, perforowanych, niskich przewodów odciążających, a rozkładem obciążeń i obrazem przepływu w komorach z takimi przewodami. Szczególną uwagę zwrócono na dobranie optymalnego kształtu, położenia i wielkości perforacji przewodów, które to parametry w sposób istotny wpływają na skuteczność przewodów. Ponadto, zamiarem pracy jest uściślenie zakresu redukcji naporu, występującej dla niskich przewodów. Wszystkie badania i analizy podjęto dla komory z płaskim dnem.

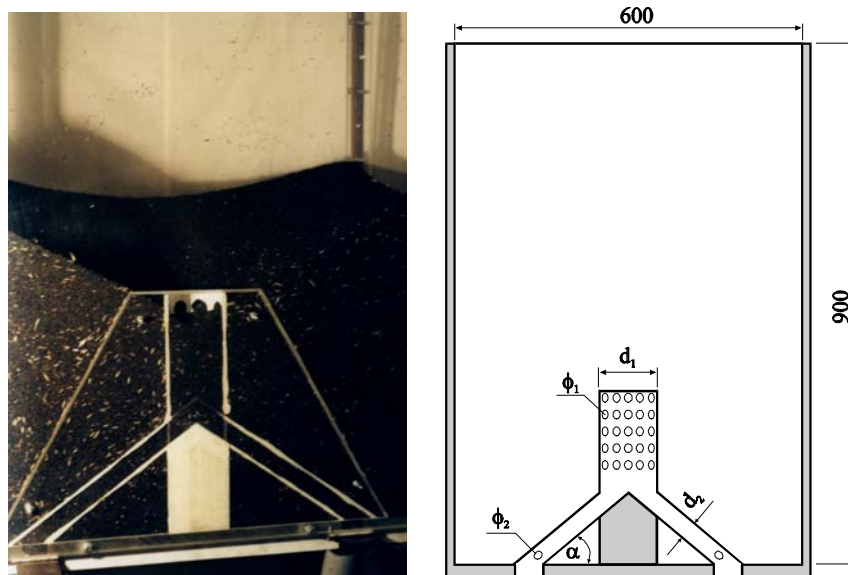
4. Tezy pracy

1. Urządzenia odciążające o małej wysokości, tzw. króćce, zamontowane w komorach silosów o dużym ilorazie wysokości do średnicy, zmniejszają przyrost poziomego naporu materiału sypkiego podczas opróżniania tylko w ograniczonym paśmie wysokości komory.
2. Skuteczność redukcji przyrostu naporu materiału sypkiego w przypadku zastosowania urządzeń redukujących o małej wysokości w stosunku do wysokości komory, zależy od średnicy rur urządzenia oraz od wielkości i usytuowania otworów perforacyjnych w rurach.
3. Wydatek opróżniania komory silosu wyposażonej w urządzenie redukujące zależy od powierzchni otworów perforacyjnych, przy czym istnieje graniczna wartość powierzchni tych otworów, powyżej której urządzenie jest nieskuteczne, ponieważ występuje nieprawidłowy przepływ materiału sypkiego.

5. Badania modelowe

5.1 Badania wstępne

W celu wstępnej analizy zjawisk towarzyszących opróżnianiu komory z użyciem urządzeń odciążających wykonano w I etapie badań model o wymiarach 0,30x0,60x0,90 m o przekroju prostokątnym. Na modelu tym (rys. 5.1) poczyniono obserwacje przepływów.



Rys. 5.1 Widok modelu komory w etapie I

Do badań użyto rzepaku o cechach fizyko-mechanicznych opisanych w podrozdziale 5.5 „Określenie właściwości materiału sypkiego”. Wykonano serię obserwacji dla trzech wariantów urządzenia odciążającego (tab.5.1).

Tablica 5.1. Parametry przewodów odciążających użytych w I etapie badań (oznaczenia jak na rys. 5.1.)

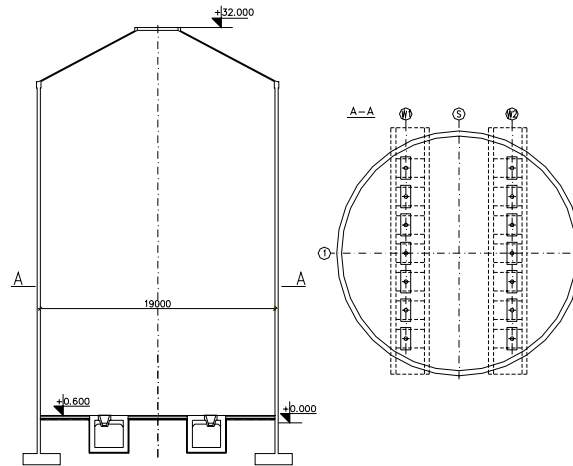
	d_1 [mm]	d_2 [mm]	ϕ_1 [mm]	ϕ_2 [mm]	α [°]
I	100	50	12	12	40
II	75	28	20	10	35
III	75	28	20	10	40

Badania wstępne miały na celu ustalenie parametrów geometrycznych przewodu odciążającego, przy których występuje najbardziej korzystny dla niego przepływ. Z poczynionych obserwacji wynika, że dla zapewnienia ciągłości przepływu i odpowiednio dużego wydatku kąt nachylenia przewodu α powinien być nie mniejszy niż 45° ze wskazaniem na większe wartości. Ponadto średnica przewodu d_2 powinna być nie mniejsza

niż 50 mm. Biorąc to pod uwagę w II etapie badań modelowych postanowiono wykonać większy model komory.

5.2 Analiza geometrii obiektu i modelu

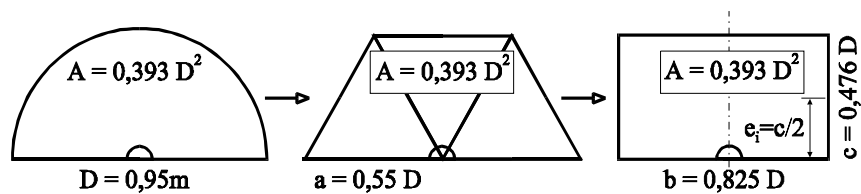
Obiektem modelowanym w badaniach jest komora silosowa średnicy 19 m, przedstawiona na rysunku 5.2. i opisana szczegółowo w rozdziale 2 „Cel i zakres pracy”.



Rys. 5.2 Komora silosowa średnicy 19m, będąca pierwowzorem badań modelowych

Powyższa komora jest silosem smukłym ($h = 29,0$ m; $d_c = 19,0$ m; $h/d_c = 1,52 > 1,5$; gdzie d_c – wymiar miarodajny przekroju), w którym występuje przepływ lejowy wewnętrzny. Na podstawie wyników badań etapu I postanowiono wykonać jego model, którego średnica będzie 20-krotnie mniejsza od średnicy obiektu.

W celu analizy rodzaju przepływu i wyznaczenia naporów teoretycznych w modelu aproksymowano półkolisty przekrój komory prostokątnym (rys. 5.3).



Rys. 5.3 Aproksymacja przekroju poprzecznego komory modelowej

Silos modelowy jest również silosem smukłym ($h = 1,3$ m; $d_c = 0,22$ m; $h/d_c = 5,91 > 1,5$).

Na poniższych wykresach przedstawiono napory poziome p_h , pionowe p_v i styczne p_w , obliczone według teorii Janssena dla komory $d = 19$ m oraz dla modelu. Z analizy wynika, że różnice wartości naporów obliczonych dla przekroju półkolistego i prostokątnego nie przekraczają 1 %. W celu późniejszej analizy, wykresy dla modelu sporządzono dla komory

prostokątnej (półwalcowej - rys. 5.4a), oraz dla pełnego przekroju kolistego (rys. 5.4b). Do wyznaczenia wartości naporów posłużyły następujące wzory:

$$p_h = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot u} C_z(z) \quad (5.1)$$

$$p_v = \frac{\gamma \cdot A}{K_s \cdot \mu \cdot u} C_z(z) \quad (5.2)$$

$$p_w = \frac{\gamma \cdot A}{u} C_z(z), \quad (5.3)$$

przy czym:

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)}, \quad (5.4)$$

$$z_0 = \frac{A}{K_s \cdot \mu \cdot u}, \quad (5.5)$$

gdzie: γ – ciężar objętościowy materiału sypkiego [kN/m³],

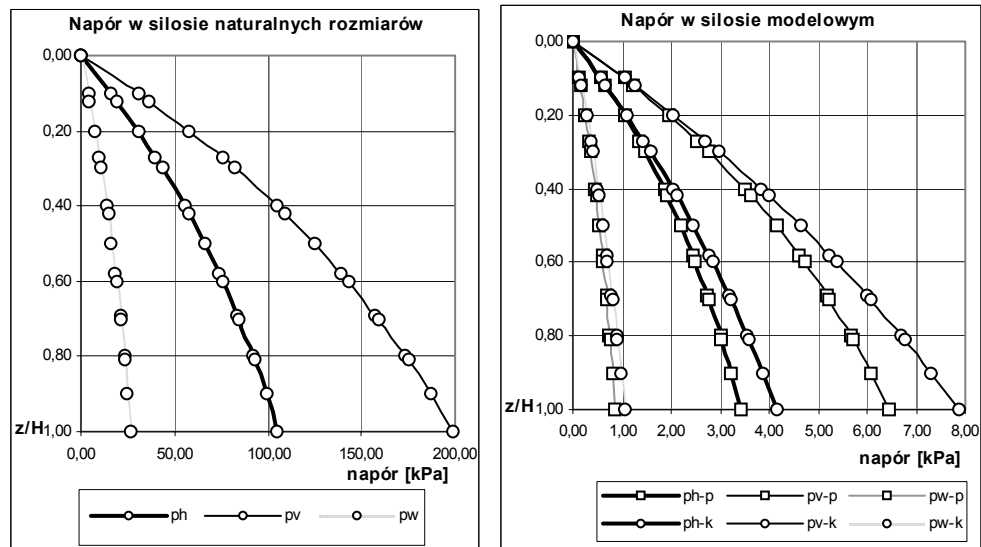
A – pole przekroju poprzecznego komory [m²],

μ – współczynnik tarcia materiału sypkiego o ścianę komory [-],

u – obwód komory [m],

K_s – iloraz naporu poziomego do pionowego [-],

z – rozpatrywana głębokość [m],



Rys. 5.4 Przewidywany napór w komorze naturalnych rozmiarów oraz w silosie modelowym

Przyjęte do obliczeń wartości parametrów materiałowych i uzasadnienie ich przyjęcia zamieszczono w podrozdziale 5.5 „Określenie właściwości materiału sypkiego”.

Z wykresów wynika, że w dolnej części komory modelowej należy spodziewać się wartości naporów poziomych $3,5 \div 4,0$ kPa, pionowych ok. 6,5 kPa, a stycznych nie większych niż 1,0 kPa.

5.3 Model badawczy

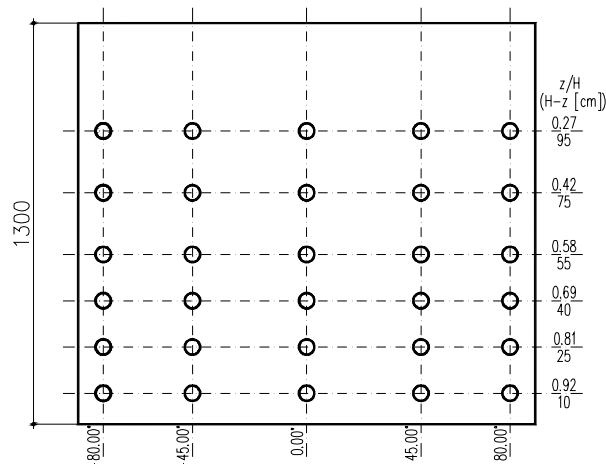
Model został wykonany jako półwalec z przezroczystą przednią ścianą. Widok stanowiska badawczego przedstawia rysunek 5.5.



Rys. 5.5 Widok stanowiska pomiarowego do badań urządzeń odciążających

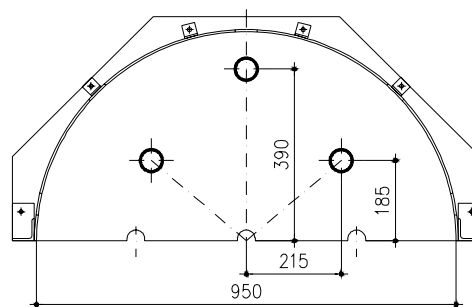
Półkolistą ścianę modelu i dno wykonano z blachy stalowej grubości 6 mm. Promień zakrzywienia ściany wynosi 475 mm. Całość opiera się na ramie z ceowników wspartych na trzech słupkach o przekroju rurowym. U góry walcową powłokę spięto kątownikiem stalowym. Pozostała górna powierzchnia pozostaje odkryta. Do tak przygotowanej konstrukcji przymocowano z przodu płytę ze szkła organicznego, grubości 20 mm, na której naniesiono trwale linie siatki w odstępach 5 cm, pomocne przy obserwacji przepływów. Stalowa ściana modelu grubości 6 mm i promieniu 950 mm została wyposażona w gniazda do zamocowania czujników naporu, zapewniające lokalne licowanie czujnika ze ścianą, co ma zasadniczy wpływ na poprawność mierzonych wartości naporów [26, 30, 33]. Sztywność i pomijalnie mała odkształcalność konstrukcji wosporczej, dna i ściany walcowej zapewnia warunki zbliżone do warunków w silosie żelbetowym naturalnych rozmiarów, tj. zachowany iloraz przemieszczeń promieniowych i obwodowych do odpowiednio promienia i obwodu komory.

Rysunek 5.6 przedstawia rozmieszczenie i rzędne otworów na poboczniczy modelu.



Rys. 5.6 Pobocznicą ściany silosu modelowego w rozwinięciu

Dno z blachy grubości 6 mm, wyposażono w otwory do zamontowania czujników naporu normalnego. Rozmieszczenie otworów pokazano na rysunku 5.7.



Rys. 5.7 Dno modelu z rozmieszczeniem otworów pod czujniki

Dodatkowo dno wyposażono w uchylną klapę umieszczoną o wymiarach pozwalających na montaż urządzenia odciążającego bez potrzeby zdejmowania ściany przedniej.

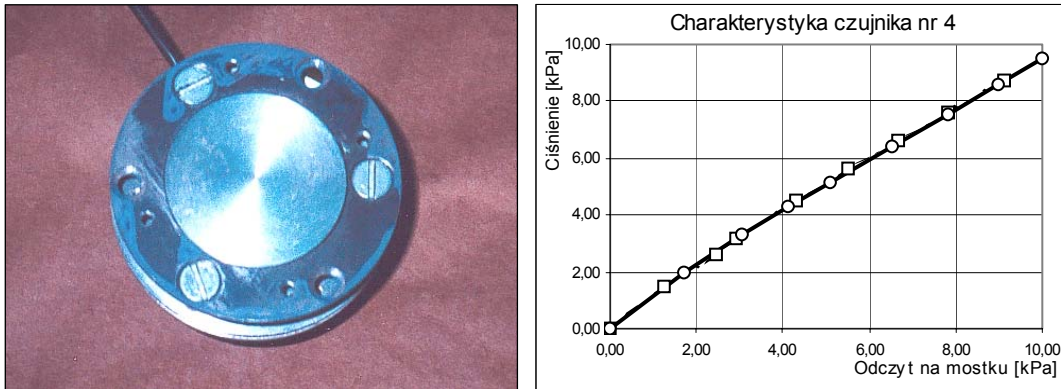
W badaniach wykorzystano też stalowy silos pomocniczy wykonany z blachy stalowej, który służył do zasypywania komory badawczej od góry i do magazynowania rzepaku po opróżnieniu. Z tej przyczyny nie realizowano pomiarów podczas jednoczesnego napełniania i opróżniania.

5.4 Aparatura pomiarowa

5.4.1 Czujniki naporu

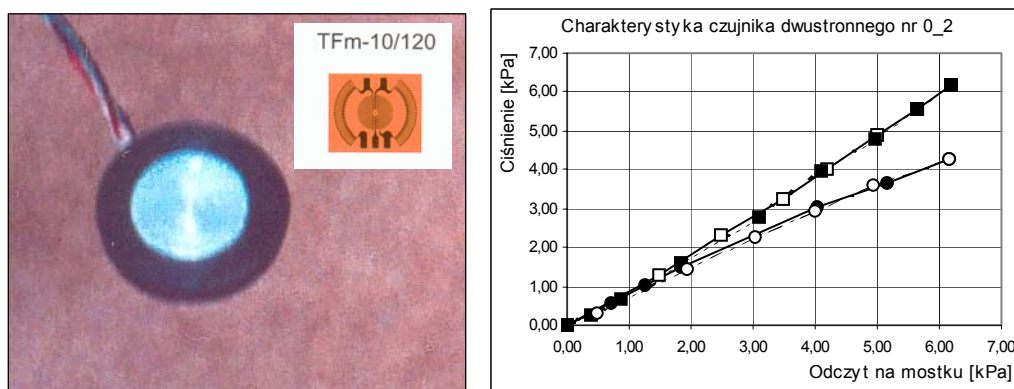
Do pomiaru naporów na ściany i dno modelu użyto tensometrycznych czujników naporu normalnego średnicy 50 mm (rys. 5.8), stosowanych m.in. przez Wirską [78],

przetwarzających odkształcenia na sygnał elektryczny. Po wewnętrznej stronie membrany naklejone są tensometry foliowe w układzie pełnego mostka, w sposób zapewniający wyeliminowanie wpływu odkształceń poprzecznych, jak zaleca się w pracy [33]. Kalibracja czujników została wykonana przy użyciu poduszki powietrznej, zasilanej sprężarką. Wartość ciśnienia kontrolowana była przez odczyt wysokości słupa wody, z dokładnością ± 1 mm. Na rysunku 5.8 pokazano przykładową krzywą kalibracji czujnika o prawidłowym, liniowym przebiegu.



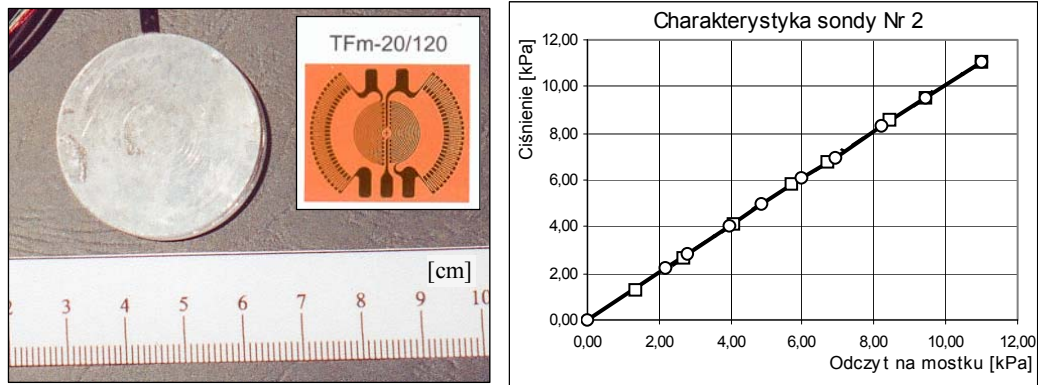
Rys. 5.8 Widok i charakterystyka czujnika tensometrycznego nr 4 z gniazdem

Zaprojektowano też czujniki tensometryczne o średnicy membrany 12 mm, w celu zastosowania ich na rurach odciążających oraz tzw. sondy o średnicy 35 mm z możliwością pogrążania w dowolnym miejscu ośrodka sypkiego. W czujnikach tych zastosowano tensometry membranowo-rozetowe. Na rysunku 5.9 zamieszczono widok czujnika dwustronnego i krzywe kalibracji.



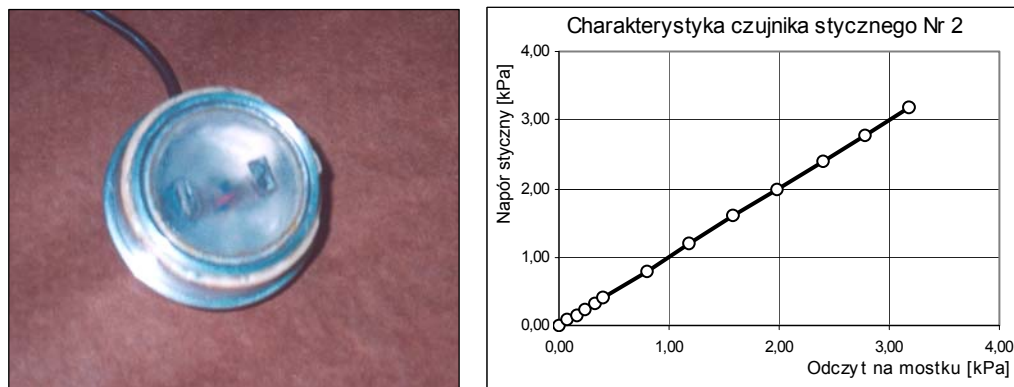
Rys. 5.9 Widok i charakterystyka dwustronnego czujnika tensometrycznego nr 0_2

Kolejny rysunek przedstawia widok i charakterystykę tzw. sondy (rys. 5.10). Charakterystyka sondy jest liniowa z zakresie do 11 kPa.



Rys. 5.10 Widok i charakterystyka dwustronnej sondy pogrzałej nr 2

W niewielkiej serii pomiarów zastosowano tensometryczny czujnik naporu stycznego. Czujnik atestowano przykładając do membrany obciążenie styczne. Widok i krzywą kalibracji tego czujnika tego czujnika zobrazowano na rysunku 5.11.



Rys. 5.11 Widok i charakterystyka kalibracji czujnika naporu stycznego nr 2

5.4.2 Tensometry elektrooporowe

Pomiaru odkształceń rurowych przewodów odciążających dokonywano za pomocą tensometrów elektrooporowych o oporności $120 \pm 2 \Omega$, o bazie pomiarowej 2 cm i stałej $k = 2,15$.

5.4.3 Rejestratory sygnałów

Sygnały elektryczne z czujników naporu normalnego i stycznego były rejestrowane przy pomocy urządzenia rejestrującego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik, o maksymalnej liczbie kanałów równej 100. Po przetworzeniu, sygnały były doprowadzone do komputera, w którym dokonywano ich zapisu. Maksymalna częstość pomiarów urządzeniem

UPM 100 wynosiła 1s/kanal i taką częstość stosowano w początkowej fazie opróżniania modelu.

Drugim zestawem pomiarowym stosowanym podczas badań był mostek Mikrotechna wraz z elektromechanicznym rejestratorem analogowym TZ 4620 firmy Laboratorní Přístroje z Pragi. Umożliwiał on ciągły zapis 2 oddzielnych sygnałów. Prędkość przesuwu taśmy 0,006÷30 cm/min., czułość 1÷50 mV (0,1÷5,0 V). Dzięki tym przyrządom możliwa była obserwacja dynamiki procesu opróżniania.

5.4.4 Rejestracja obrazu przepływu

W celu podkreślenia wyrazistości obrazu przepływu, model wypełniono rzepakiem, tworząc przewarstwienia z ziaren gorczycy. Nasiona gorczycy posiadają regularny sferyczny kształt, podobny do rzepaku ciężar objętościowy i kontrastującą z rzepakiem żółto-pomarańczową barwę. Dzięki przezroczystej przedniej ścianie modelu, wyposażonej w regularną siatkę była możliwa dokładna analiza ruchu ziaren i określenia stref pozostających w bezruchu. Charakterystyczne kształty przepływów były rejestrowane za pomocą kamery cyfrowej z rozdzielczością 768x576 pikseli (25 klatek/s) oraz cyfrowym aparatem fotograficznym z rozdzielczością 3,2 mln pikseli. Otrzymane obrazy cyfrowe poddawano następnie obróbce w programie graficznym.

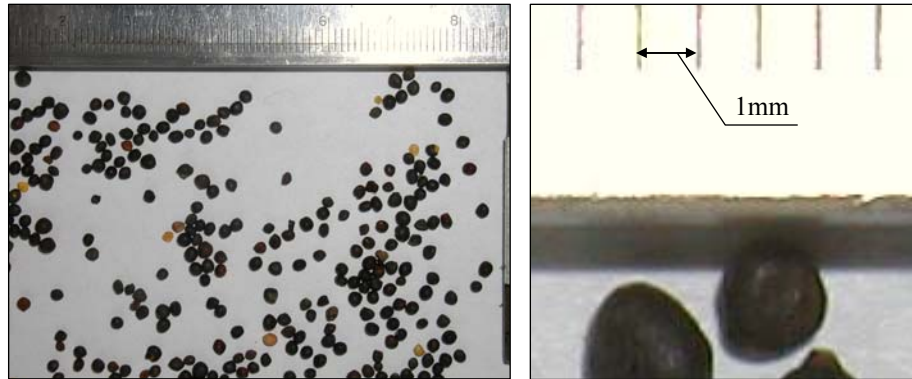
5.4.5 Pomiar wydatku

Wydatek opróżniania mierzono przez pomiar masy wypływającego ziarna w jednostce czasu. Do ważenia ziarna używano wagi laboratoryjnej Radwag typu WPT 12/C (zakres 12 kg, najmniejsza działka 0,001 kg). Do pomiaru czasu używano stopera elektronicznego o najmniejszej działce 0,01 s.

5.5 Określenie właściwości materiału sypkiego

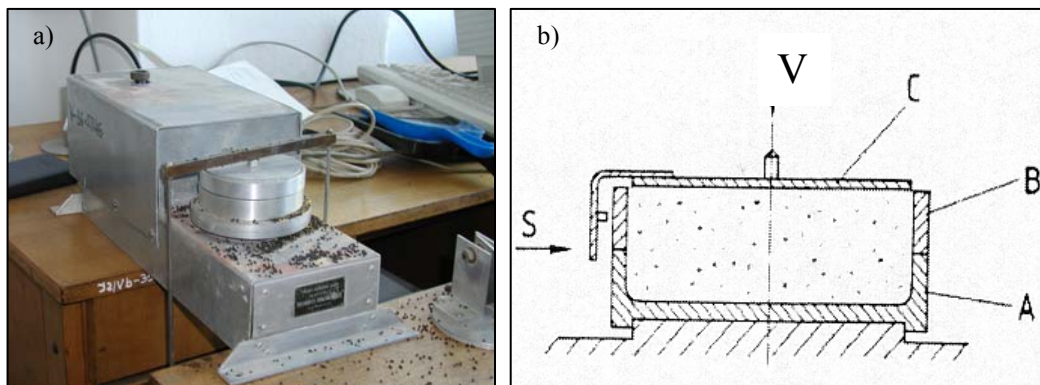
Do badań zastosowano nasiona rzepaku pochodzące ze zbiorów w roku 1999, z Zakładów Tłuszczowych w Kruszwicy. Materiał zmieniono 4-krotnie w całym programie badawczym. początku badań ziarno posiadało następujące cechy określone w laboratorium chemicznym Zakładów Tłuszczowych w Brzegu: wilgotność 6,7 % (wg PN-EN ISO

665:1999), zawartość zanieczyszczeń 5,8 %, zawartość tłuszczu 42,8 %, liczba kwasowa tłuszczu 1,75 mg KOH/g, zawartość kwasu erukowego 0,98%, gęstość objętościowa 8,5 kN/m³. Nasiona posiadały regularny, zbliżony do sferycznego kształt, a mediana średnicy pojedynczego ziarna wynosiła $x_{50} = 1,98$ mm (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Pomiaru średnicy ziaren dokonano przez analizę obrazu cyfrowego

Cechy mechaniczne nasion rzepaku określono w aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 5.13) według metody opisanej przez Jenikego [17], rozwiniętej m.in. przez Schwedesa [69].



Rys. 5.13. Aparat bezpośredniego ścinania użyty do określenia cech mechanicznych rzepaku: a) widok urządzenia, b) przekrój poprzeczny A – podstawa, B - pierścień, C - pokrywka

Po przyłożeniu obciążenia V , odpowiadającego naprężeniom w silosie (4 kPa) za pomocą ramki z ciężarkami i wykonaniu 30 tzw. twistów, dokonywano ścięcia materiału przez przesuw ramki dla różnych obciążeń pionowych, mniejszych od naprężeń konsolidujących.

Wyznaczono kąt tarcia kontaktowego φ_{es} o pomalowaną stalową podkładkę, odpowiadającą stalowej cylindrycznej ścianie modelu.

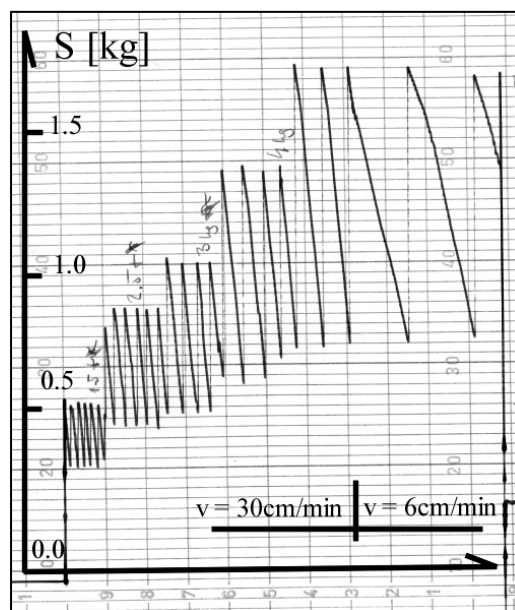
Określono również kąt tarcia o płytkę z pleksiglasu, odpowiadającą przedniej ścianie modelu i przewodom odciażającym. Podczas badania odważniki umieszczono bezpośrednio na pokrywce i rejestrowano siłę poziomą S .

Kąt tarcia kontaktowego o pleksiglas określono dla różnych naprężeń konsolidujących i uzyskano wyniki zestawione w tabelicy 5.2.

Tablica 5.2 Kąt tarcia kontaktowego o próbkę ze szkła organicznego przy różnych naprężeniach konsolidujących

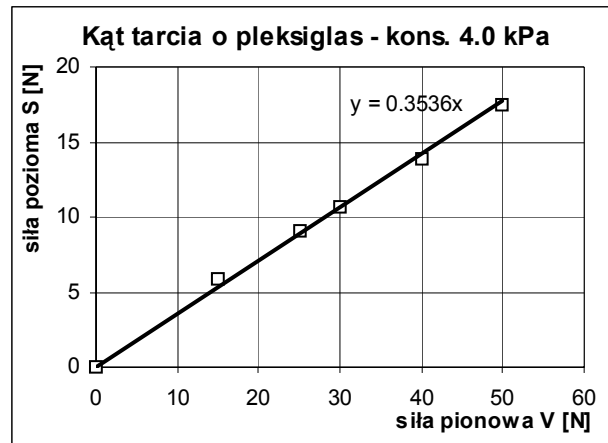
Naprężenie konsolidujące [kPa]	Kąt tarcia o próbkę [°]
2,4	20,1
4,0	19,5
8,0	20,4
16,0	19,9

Nie stwierdzono określonej zależności pomiędzy kątem tarcia kontaktowego a naprężeniami konsolidującymi. Przebieg ścinania w aparacie Jenikego dla naprężeń konsolidujących 4 kPa, zarejestrowany przy użyciu rejestratora analogowego przedstawia rysunek 5.14.



Rys. 5.14. Przebieg ścinania podczas badania kąta tarcia kontaktowego o pleksiglas

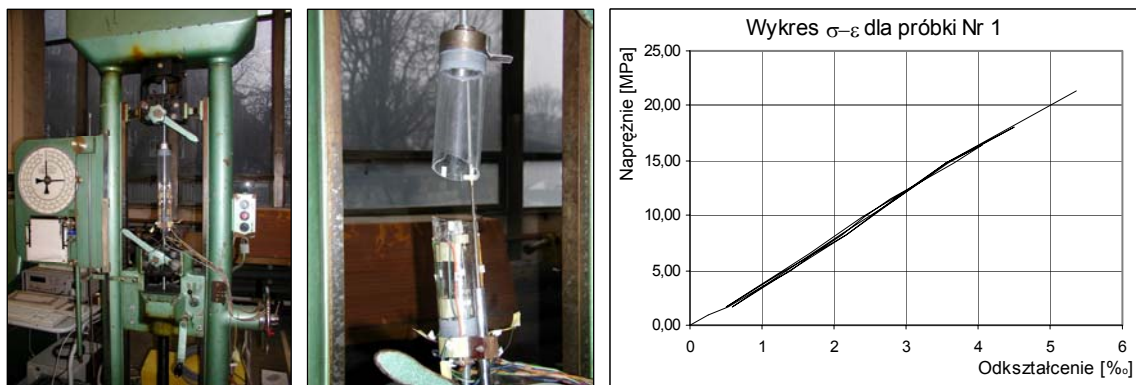
Do dalszych analiz przyjęto kąt tarcia $19,5^\circ$, odpowiadający przewidywanym naprężeniom konsolidującym w silosie, wynoszącym 4 kPa. Na rysunku 5.15 przedstawiono wyniki pomiarów kąta tarcia dla pleksiglasu z naniesioną krzywą ścinania.



Rys. 5.15. Wyniki pomiaru kąta tarcia o pleksyglas $\varphi_{ep} = 19.5^\circ$

5.6 Inne prace przygotowawcze

W ramach dodatkowych prac przygotowawczych określono moduł sprężystości rur z Plexiglasu[®], stosowanych do modelowania przewodów odciażających. Badania przeprowadzono według zaleceń normy PN-82/C-89051 na maszynie wytrzymałościowej przystosowanej do badania tworzyw sztucznych (rys. 5.16).



Rys. 5.16. Zrywanie próbki rury w maszynie wytrzymałościowej i wykres σ - ε

Przyjęto do dalszych badań moduł sprężystości materiału rur $E = 3600$ MPa.

W celu wykrycia ewentualnych nieprawidłowości działania stanowiska badawczego wykonano serię próbną zasypów komory z podłączonymi przyrządami pomiarowymi, a przed każdą serią pomiarową sprawdzano poprawność zerowania czujników naporu. Po zakończonych badaniach powtórnie poddano czujniki kalibracji i nie stwierdzono odchyłek wartości stałych czujników względem kalibracji sprzed pomiarów.

5.7 Analiza wymiarowa podobieństwa modelowego

Do badań wpływu parametrów geometrycznych rurowych urządzeń odciażających na obraz przepływu materiału sypkiego i rozkład obciążeń w silosach skonstruowano w skali 1:20 model komory silosowej o półkolistym przekroju. Wysokość komory 1,35 m, średnica półkolistego dna 0,9 m.

Analizę podobieństwa modelu i obiektu przeprowadzono w oparciu o analizę wymiarową. Założono, że obiektem modelowanym jest półkolistą komora średnicy 19 m.

Podstawowe twierdzenia analizy wymiarowej to:

- wymiar każdej wielkości pochodnej może być wyrażony jako iloczyn potęgowy wymiarów wielkości podstawowych;
- twierdzenie Buckinghama: wzorowi fizykalnemu

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) = 0, \quad (5.6)$$

zawierającemu n wielkości fizycznych Q odpowiada wzór

$$F(K_1, K_2, K_3, \dots, K_{n-m}) = 0, \quad (5.7)$$

gdzie: m – liczba wielkości podstawowych, wymiarowo niezależnych, dających się wybrać spośród Q ,

K_1, K_2, \dots – bezwymiarowe iloczyny utworzone z wielkości Q ,

co można wyrazić następująco: każdy wzór fizykalny zgodny wymiarowo można przekształcić do postaci bezwymiarowej, łącząc wielkości Q w odpowiednie bezwymiarowe grupy K , których liczba jest mniejsza od liczby wielkości Q ;

- zasada Fouriera: wszystkie prawa fizyki wyrażają się równaniami wymiarowo jednorodnymi; funkcja jest wymiarowo jednorodna, gdy postać jej nie zależy od jednostek miar, zachodzi wtedy tożsamość:

$$f(a_1 Q_1, a_2 Q_2, \dots, a_n Q_n) = a f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \quad (5.8)$$

wielkości Q_1, Q_2, \dots, Q_n są wymiarowo niezależne, jeżeli z tożsamości

$$[Q_1^a] [Q_2^b] \dots [Q_n^x] = 1 \quad (5.9)$$

wynika

$$a = b = \dots = x = 0, \quad (5.10)$$

to znaczy, że iloczyn określony równaniem (5.9) pozostaje bezwymiarowy wyłącznie w przypadku, gdy każdy wykładnik potęgowy jest równy 0.

Założono, że przepływ w komorze zależy od następujących czynników:

H – wysokość komory silosu [m],

D – średnica komory silosu [m],

- d_R – średnica rury odciążającej [m],
 d_A – średnica otworu wysypowego [m],
 d_O – średnica otworu w rurze [m],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
 ρ_b – ciężar objętościowy materiału sypkiego [kN/m^3],
 h_R – rzędna górnego końca rury odciążającej [m],
 ψ_i – współczynnik perforacji rury (d_A/d_R) [-],
 δ_i – iloraz promienia hydraulicznego rury przez promień hydrauliczny komory [-],
 p_h – napór poziomy na ścianę komory [N/m^2].

Zatem przepływ w silosie wyposażonym w urządzenie odciążające uzależniony jest od następujących parametrów:

$$f(H, D, d_R, d_A, d_O, g, \rho_b, h_R, \psi_i, \delta_i, p_h) = 0, \quad (5.11)$$

Przyjęto jako podstawowe wielkości wymiarowo niezależne H , g i ρ_b . Kryteria podobieństwa wyznaczone za pomocą zasady Fouriera są postaci:

$$K_1 = D \cdot H^{a_1} \cdot g^{b_1} \cdot \rho_b^{c_1} \quad (5.12)$$

$$[K_1] = D \cdot m^{a_1} \cdot \left(\frac{kN}{m^3}\right)^{b_1} \cdot \left(\frac{m}{s^2}\right)^{c_1} \quad (5.13)$$

$$\text{dla } [kN]: c_1 = 0$$

$$\text{dla } [s]: -2b_1 = 0$$

$$\text{dla } [m]: 1 + a_1 + b_1 - 3c_1 = 0 \Rightarrow a_1 = -1$$

$$K_1 = \frac{H}{D}. \quad (5.14)$$

Podobnie, dla pozostałych wielkości wyrażonych w [m] iloczyny otrzymają postać:

$$K_2 = d_R \cdot H^{a_2} \cdot g^{b_2} \cdot \rho_b^{c_2}, \quad (5.15)$$

$$K_2 = \frac{d_R}{D}, \quad (5.16)$$

$$K_3 = d_A \cdot H^{a_3} \cdot g^{b_3} \cdot \rho_b^{c_3}, \quad (5.17)$$

$$K_3 = \frac{d_A}{D}, \quad (5.18)$$

$$K_4 = d_O \cdot H^{a_4} \cdot g^{b_4} \cdot \rho_b^{c_4}, \quad (5.19)$$

$$K_4 = \frac{d_O}{D}, \quad (5.20)$$

$$K_5 = h_R \cdot H^{a5} \cdot g^{b5} \cdot \rho_b^{c5}, \quad (5.21)$$

$$K_5 = \frac{h_R}{D}. \quad (5.22)$$

Natomiast dla bezwymiarowych wielkości ψ_i oraz δ_i otrzymuje się:

$$K_6 = \psi_i, \quad (5.23)$$

$$K_7 = \delta_i. \quad (5.24)$$

Dla p_h iloczyn K ma postać:

$$K_8 = p_h \cdot H^{a6} \cdot g^{b6} \cdot \rho_b^{c6} \quad (5.25)$$

$$K_8 = \frac{p_h}{D}. \quad (5.26)$$

Funkcja opisująca przepływ w silosie będzie postaci:

$$f\left(\frac{H}{D}, \frac{d_R}{D}, \frac{d_A}{D}, \frac{d_O}{D}, \psi_i, \delta_i, \frac{p_h}{D}\right) = 0 \Rightarrow \frac{p_h}{D} = \Psi\left(\frac{H}{D}, \frac{d_R}{D}, \frac{d_A}{D}, \frac{d_O}{D}, \psi_i, \delta_i\right) \quad (5.27)$$

Warunki podobieństwa, które powinien spełniać model badawczy w skali 1:20 będą zatem następujące:

$$\frac{H_m}{H_o} = \frac{1}{20} \Rightarrow H_m = 1,35m, \quad (5.28)$$

$$\frac{D_m}{D_o} = \frac{1}{20} \Rightarrow D_m = 0,90m, \quad (5.29)$$

$$\frac{d_{Rm}}{d_{Ro}} = \frac{1}{20} \Rightarrow d_{Rm} = 2cm, \quad (5.30)$$

$$\frac{d_{Am}}{d_{Ao}} = \frac{1}{20} \Rightarrow d_{Am} = 0,75cm, \quad (5.31)$$

$$\frac{d_{Om}}{d_{Oo}} = \frac{1}{20} \Rightarrow d_{Om} = 1,0cm, \quad (5.32)$$

$$\psi_{im} = \psi_{io}, \quad (5.33)$$

$$\delta_{im} = \delta_{io}. \quad (5.34)$$

Ze wzorów na warunki podobieństwa (5.28-5.34) wynika, że wymiary geometryczne modelu powinny być pomniejszone względem obiektu dwudziestokrotnie. Z badań wstępnych (pkt. 5.1) wynika jednak, że przy zachowaniu skali 1:20 dla przewodów odciażających, przepływ jest utrudniony, a nawet zanika. Jest to spowodowane użyciem w badaniach modelowych rzepaku, czyli tego samego materiału, jaki występuje na obiekcie. Minimalna średnica

przewodu określona w badaniach wstępnych wynosi 50 mm (skala 1:8). Zestawienie skal podstawowych parametrów modelu przedstawia tablica 5.3.

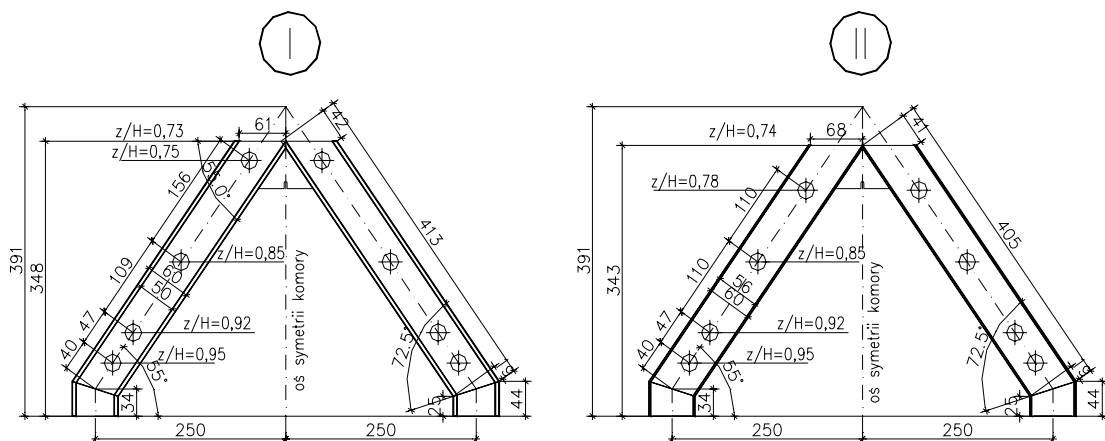
Tablica 5.3 Zestawienie skal podstawowych parametrów modelu

parametr	jednostka	obiekt naturalny	model	skala
średnica komory	[m]	19,00	0,95	1:20
wysokość komory	[m]	27,00	2,35	1:20
średnica rury odciążającej	[m]	0,40	0,05	1:8
przekrój rury odciążającej	[m ²]	0,12	0,001	1:123
przekrój otworu wysypowego	[m ²]	0,03	0,0008	1:39
wydatek opróżniania	[kg/min]	800,0	9,5	1:85

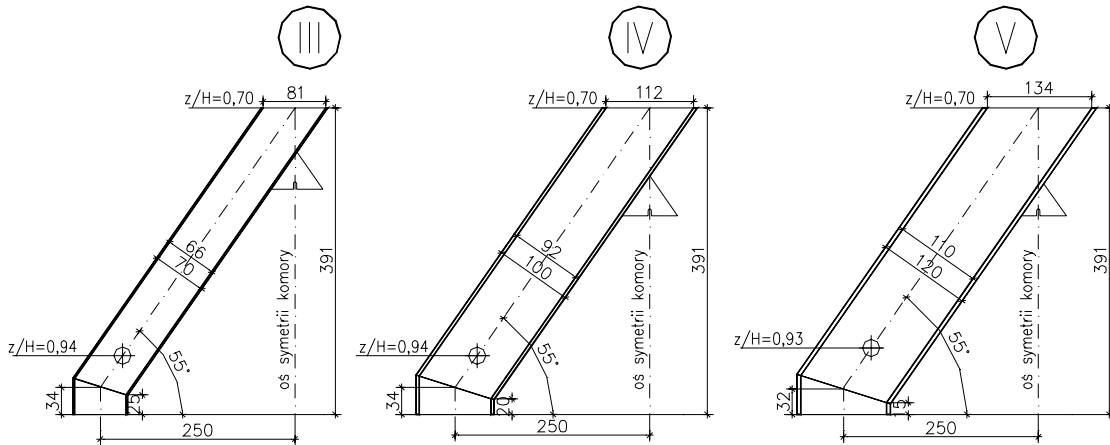
Konsekwencją użycia tego samego materiału w badaniach, jaki używany jest w obiekcie jest odejście od podobieństwa modelowego przewodów odciążających i zmiana ich skali z 1:20 na 1:8. Pozostałe warunki odwzorowania komory silosowej pozostają zachowane: pomijalnie mała odkształcalność obwodowa i promieniowa ściany cylindrycznej, mała odkształcalność przedniej ściany i sztywne dno. Parametry te zapewniają występowanie naporów o wartościach odpowiadającym zasadom podobieństwa modelowego.

5.8 Program badań

Program badań doświadczalnych w II etapie obejmował pomiary naporu rzepaku na ściany i dno, pomiary odkształceń rurowych przewodów odciążających, pomiar wydatku oraz obserwację i rejestrację przepływów. Zastosowane do badań podstawowe typu przewodów odciążających przedstawiono na rysunku 5.17 i na rysunku 5.18.

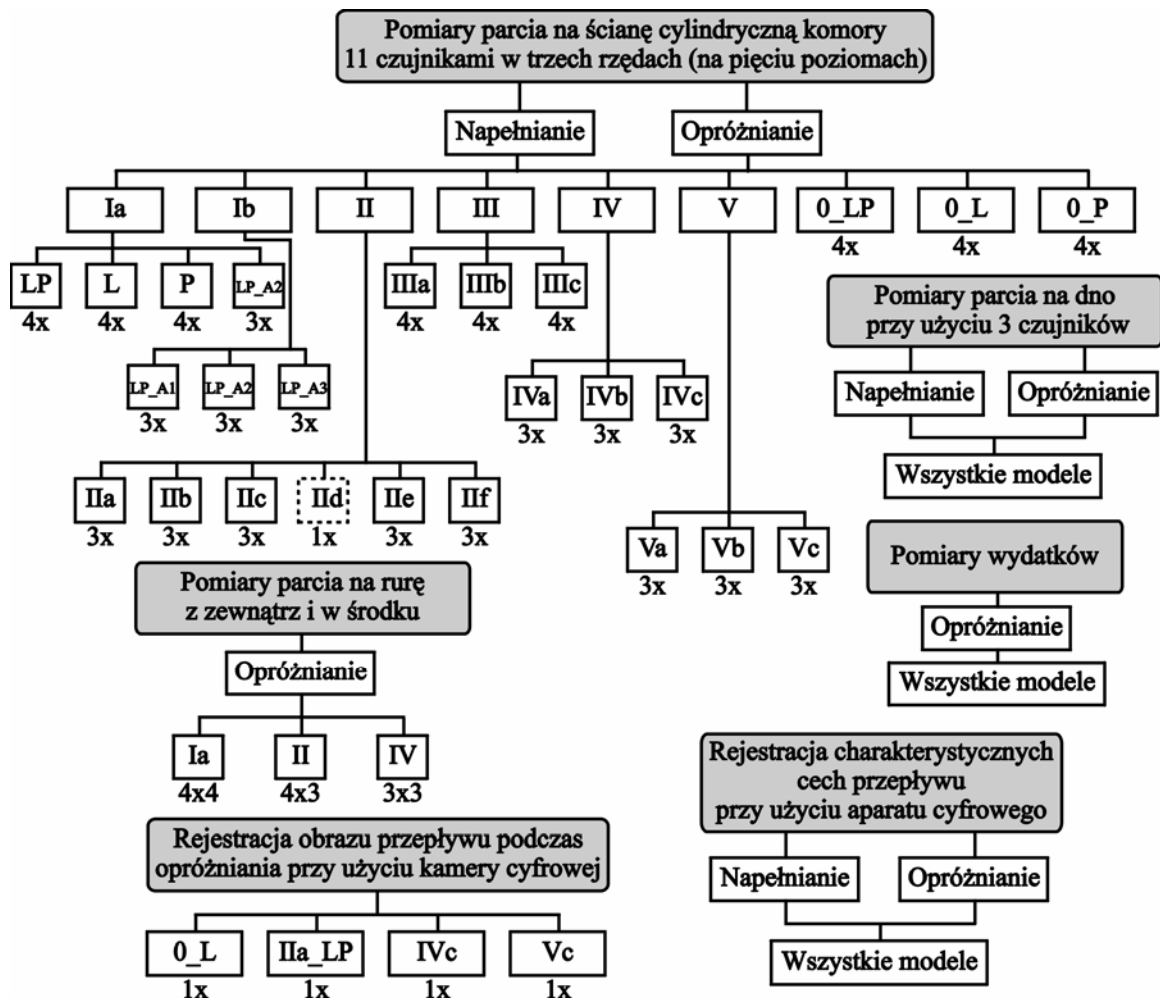


Rys. 5.17 Przewody odciążające dwugięzowe typu I (grubościenne) i typu II (cienkościenne) zastosowane w badaniach






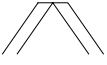




Rys.5.18 Przewody odciążające jednogłęziowe typu III, IV i V zastosowane w badaniach

Schematycznie program badań przedstawiono na rysunki 5.19 a szczegółowe zestawienie zmiennych parametrów badanych przewodów zamieszczono w tablicy 5.4.












Rys.5.19 Schematyczny program zrealizowanych badań

Tablica 5.4 Zestawienie zmiennych parametrów badanych przewodów odciążających

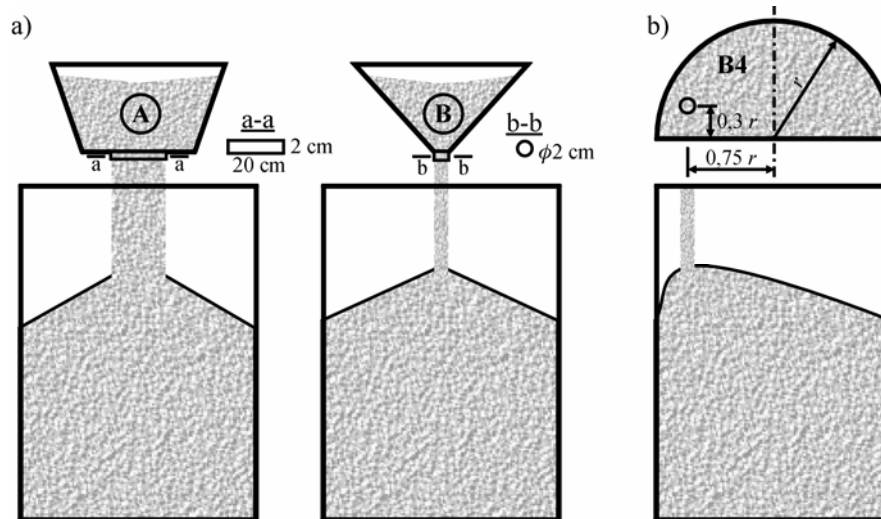
Parametry \ Oznaczenie przewodu	Ia	Ib	Ila	Ilb	Ilc	IId	Ile	IIf
Schemat przewodu								
Średnica wewnętrzna przewodu [mm]	50	50	56	56	56	56	56	56
Grubość ścianki przewodu [mm]	5	5	2	2	2	2	2	2
Pole powierzchni otworu wlotowego (góra) [mm ²]	2x1200	2x1200	2x1504	2x1504	2x1504	2x1504	2x1504	2x1504
Pole powierzchni (max.) otworu wylotowego (dół) [mm ²]	2x830	2x830	2x1062	2x1062	2x1062	2x1062	2x1062	2x1062
Wysokość przewodu h [mm], iloraz h/H [-]	350 (0,27)	350 (0,27)	338 (0,26)	338 (0,26)	338 (0,26)	338 (0,26)	338 (0,26)	338 (0,26)
Rzędna górnego końca przewodu z/H [-]	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Wielkość otworów perforacyjnych [mm]	ϕ 22	ϕ 22	ϕ 22	38x68	ϕ 28	ϕ 22	-	ϕ 25
Ilość otworów perforacyjnych [szt.]	1	1	1	1	1	1	0	4
Kształt otworów perforacyjnych	kolisty	kolisty	kolisty	prostok.	kolisty	kolisty	-	kolisty
Stopień perforacji pasma przewodu z otworem	380/2073=0,18	380/2073=0,18	380/2073=0,18	2584/3572=0,72	615/2632=0,23	380/2073=0,18	-	2961/16450=0,18
Rzędna środka otworu (-ów) perf. z/H [-]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	-	0,84; 0,87; 0,91; 0,95
Położ. otworu perf. względem osi przewodu [mm]	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	-	osiowe
Inne		ścięte górnych końców - kąt 20°				otwór tylko na lewym ramieniu		szereg 4 otworów
Materiał	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas

Tablica 5.4 c.d.

Parametry \ Oznaczenie przewodu	IIIa	IIIb	IIIc	IVa	IVb	IVc	Va	Vb	Vc
Schemat przewodu									
Średnica wewnętrzna przewodu [mm]	66	66	66	92	92	92	110	110	110
Grubość ścianki przewodu [mm]	2	2	2	4	4	4	5	5	5
Pole powierzchni otworu wlotowego (górze) [mm ²]	2089	2089	2089	4058	4058	4058	5800	5800	5800
Pole powierzchni (max.) otworu wylotowego (dół) [mm ²]	1710	1710	1710	3324	3324	3324	4752	4752	4752
Wysokość przewodu h [mm], iloraz h/H [-]	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)	390 (0,30)
Rzędna górnego końca przewodu z/H [-]	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Wielkość otworów perforacyjnych [mm]	-	45x80	32	-	50x105	43	-	60x110	58
Ilość otworów perforacyjnych [szt.]	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Kształt otworów perforacyjnych	kolisty	prostok.	kolisty	kolisty	prostok.	kolisty	kolisty	prostok.	kolisty
Stopień perforacji odcinka przewodu	-	0,77	0,24	-	0,72	0,23	-	0,64	0,25
Rzędna środka otworu (-ów) perf. z/H [-]	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93
Położ. otworu perf. względem osi przewodu [mm]	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe	osiowe
Materiał	pcw	pcw	pcw	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas	plexiglas

Napełnianie komory realizowano na dwa podstawowe sposoby, przedstawione na rysunku 5.20a. Były to:

1. zasypywanie strugą z otworu o wymiarach 2x20 cm z wydatkiem 2,6 kg/s – sposób **A**,
2. zasyp strugą z otworu ϕ 20 mm z wydatkiem 0,6 kg/s – sposób **B**.



Rys. 5.20 Podstawowe sposoby napełniania komory modelowej (a), stosowane dla jednoramiennych przewodów napełnianie mimośrodowe (b)

Realizowano obydwa sposoby napełniania w kilku odmianach. Sposób A:

- centrycznie w kierunku środka komory (w połowie promienia półwalca) – **A1**,
- centrycznie przy przedniej płaskiej ścianie – **A2**,
- centrycznie przy tylnej ścianie cylindrycznej – **A3**.

Sposób B:

- centrycznie w kierunku środka komory – **B1**,
- centrycznie w przy przedniej płaskiej ścianie – **B2**,
- centrycznie przy tylnej ścianie cylindrycznej – **B3**,
- mimośrodowo według rysunku 5.20b – **B4** (tylko dla jednoramiennych przewodów).

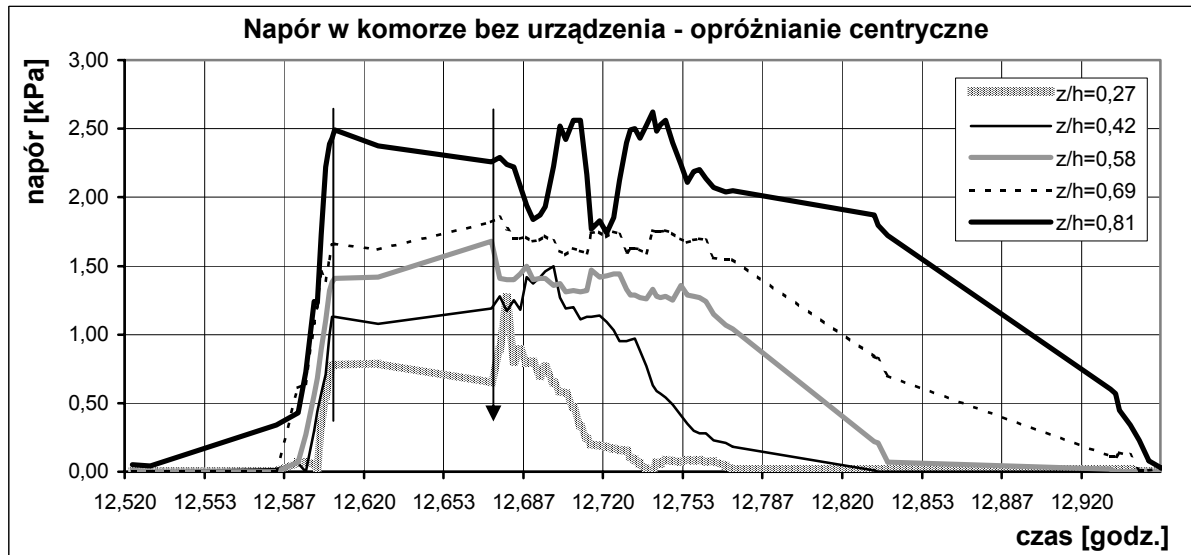
Zasadniczo stosowano sposób **A1**, zasypując komorę w środku jej przekroju. Inne sposoby napełniania odnotowano przy prezentacji wyników.

5.9 Wyniki badań modelowych

5.9.1 Obciążenia ścian i dna

Podczas badań mierzono m.in. napór normalny na stalową ścianę cylindryczną za pomocą aparatury pomiarowej opisanej w punkcie 5.4. Napełnianie komory realizowano sposobem A, opisanym w punkcie 5.8. W pierwszej kolejności wykonano pomiary naporu w komorze bez urządzeń odciążających opróżnianej przez otwór usytuowany w osi, a także przez otwory usytuowane niecentrycznie.

Na rysunku 5.21 przedstawiono przebieg w czasie naporów na pionowy rząd czujników usytuowany w osi komory, rejestrowany podczas napełniania i opróżniania przez otwór usytuowany centralnie.

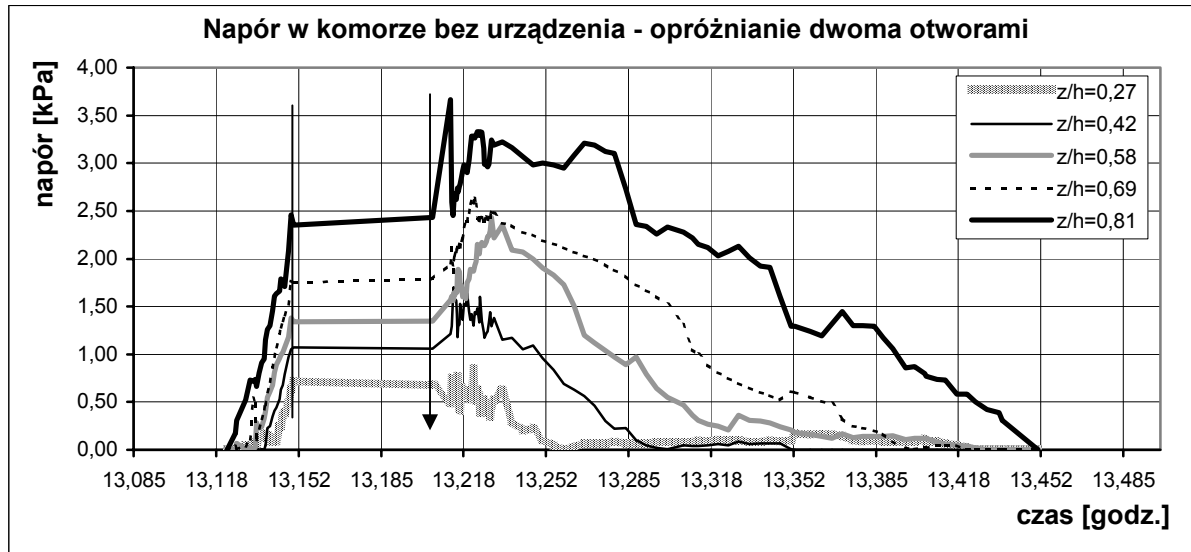


Rys. 5.21 Wykres naporów w czasie napełniania i opróżniania centralnego (opis w tekście)

Linia pionową oznaczono koniec napełniania. Odcinek między linią pionową a strzałką oznaczającą początek opróżniania (4 min.) odpowiada redystrybucji naporu w pełnej komorze. Najwyższy ($z/h = 0,81$) i najniższy ($z/h = 0,27$) czujnik zarejestrował spadek naporu, czujniki pośrednie wzrost. Podczas napełniania nie zarejestrowano pików naporu, co sugeruje, że procesowi napełniania nie towarzyszą efekty dynamiczne. Procesowi opróżniania towarzyszą pulsacje o charakterze quasi dynamicznym (rzędne 12,69-12,77). Największą wartość naporu zarejestrowano podczas opróżniania w poziomie $z/h = 0,81$ (2,62 MPa).

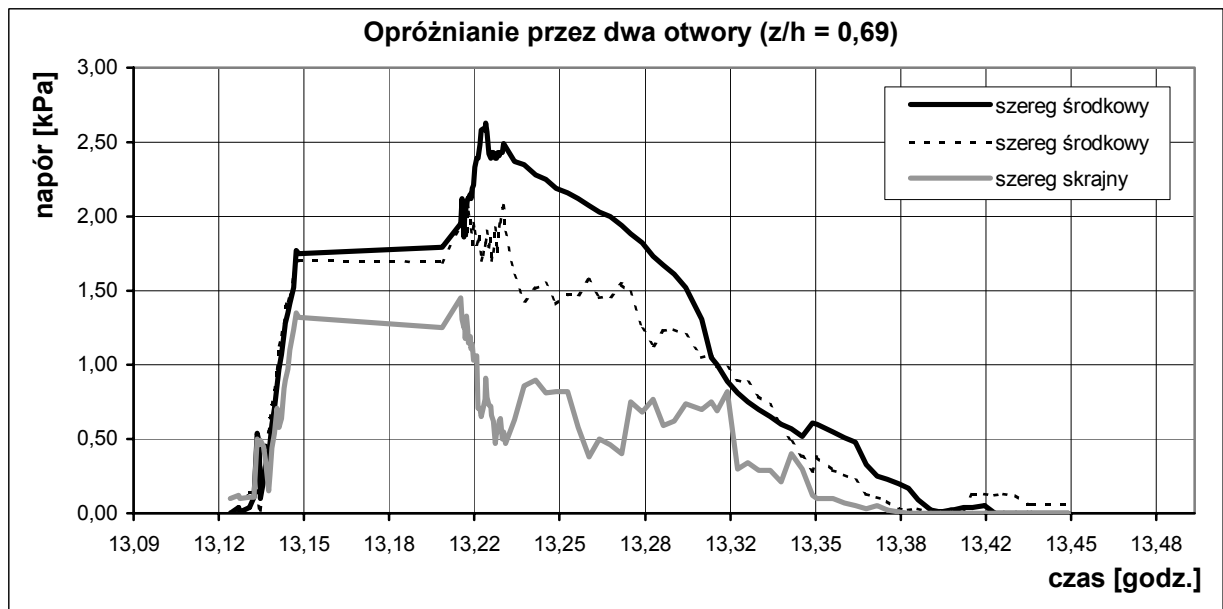
Napełnianie i opróżnianie przez dwa otwory usytuowane mimośrodowo ($e = 0,25$ m) obrazuje rysunek 5.22. Pomiedzy końcem napełniania a początkiem opróżniania nie zaobserwowano zmian w wartościach naporu. Widoczne są wyraźne dynamiczne pulsacje na początku

opróżniania, trwające ok. 2 min., którym towarzyszą zwiększenia naporu na wszystkich poziomach. Maksymalna wartość naporu wyniosła 3,67 MPa ($z/h = 0,81$) - wzrost ponad wartość statyczną o 56 %.



Rys. 5.22 Wykres naporów w czasie napelniania i opróżniania (opis w tekście)

Porównanie naporów w poziomie $z/h = 0,69$ w trzech szeregach czujników zamieszczono na rysunku 5.23.



Rys. 5.23 Wykres naporów w czasie napelniania i opróżniania przez dwa otwory ($z/H=0,69$)

Analizując napory na ściany posłużono się przyjmowanymi przez autorów prac [22, 26, 30, 32] współczynnikami dynamicznymi, współczynnikami redukcji naporu, wraz ze

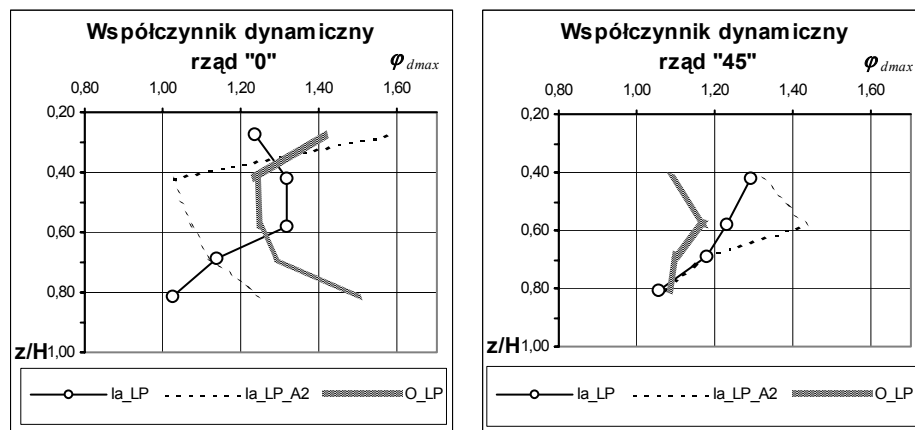
zobrazowaniem nierównomierności ich rozkładu. Współczynnik dynamiczny zdefiniowany jest jak poniżej:

$$\varphi_d = \frac{p_h^{dyn}}{p_h^{stat}}, \quad (5.35)$$

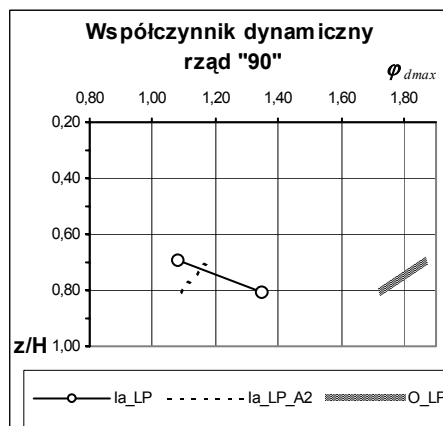
gdzie: p_h^{dyn} – napór dynamiczny (po otwarciu otworu wysypowego), kPa,

p_h^{stat} – napór statyczny po napełnieniu, kPa.

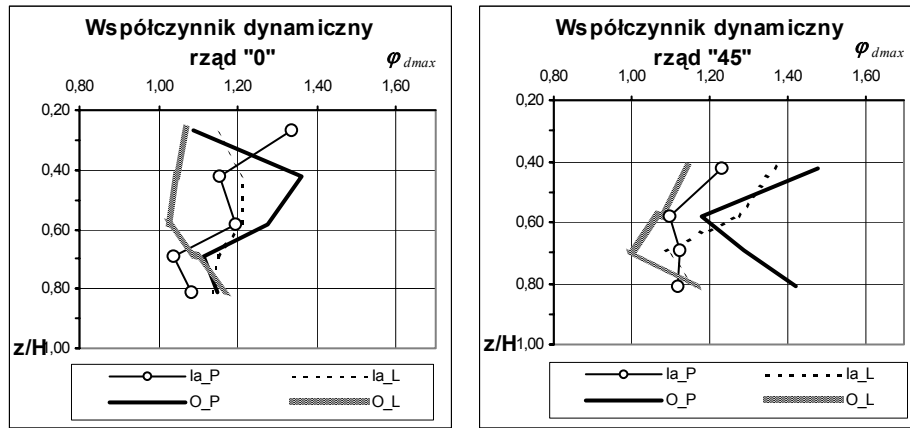
Rozpatrywany przedział czasu uwzględniany przy obliczaniu współczynników przyjmowany był indywidualnie dla każdego procesu opróżniania i obejmował początkowy zakres czasu z wyraźnymi pulsacjami naporu. Oznaczenia L, P odnoszą się do rodzaju opróżniania i opisują odpowiednio: opróżnianie otworem lewym i opróżnianie otworem prawym, zaś rząd czujników opisany jest cyfrą arabską. Współczynniki dynamiczne dla poszczególnych modeli przewodów, opisanych w punkcie 5.8 „Program badań”, przedstawiono na wykresach poniżej.



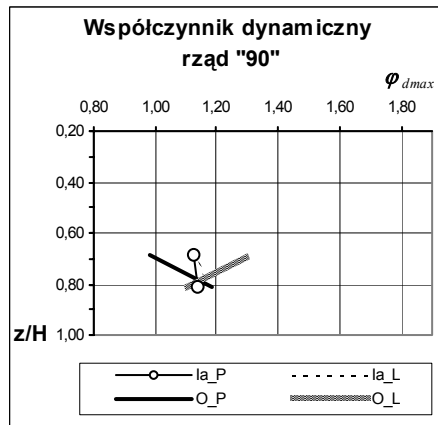
Rys. 5.24 Współczynnik dynamiczny – model Ia_LP (rzqd 0 i 45)



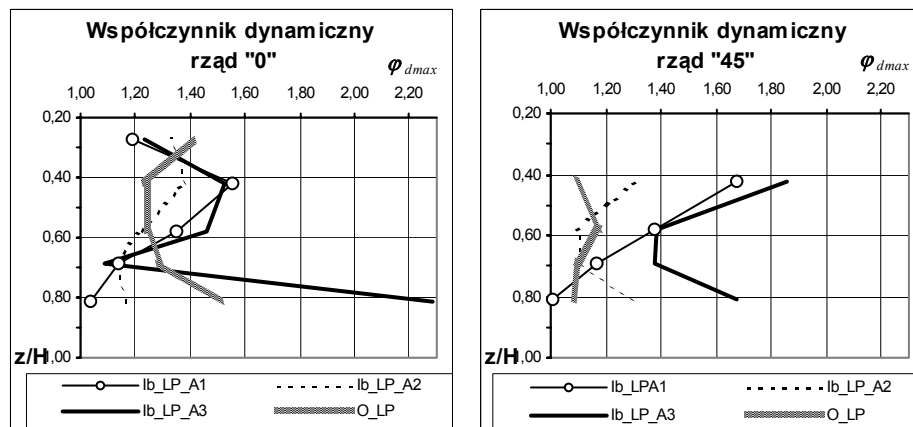
Rys. 5.25 Współczynnik dynamiczny – model Ia_LP (rzqd 90)



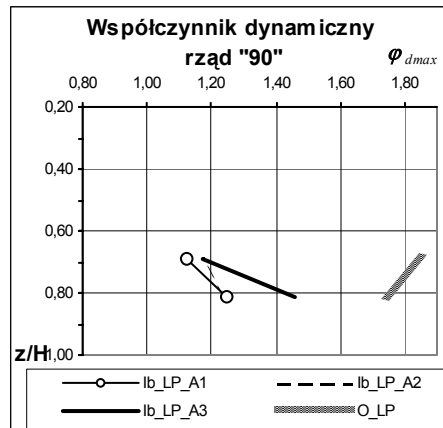
Rys. 5.26 Współczynnik dynamiczny – model Ia_L I Ia_P (rzad 0 i 45)



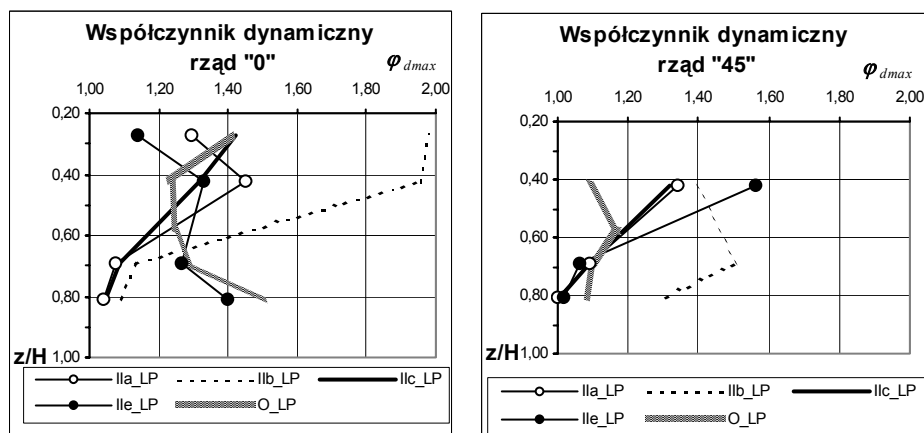
Rys. 5.27 Współczynnik dynamiczny – model Ia_L I Ia_P (rzad 90)



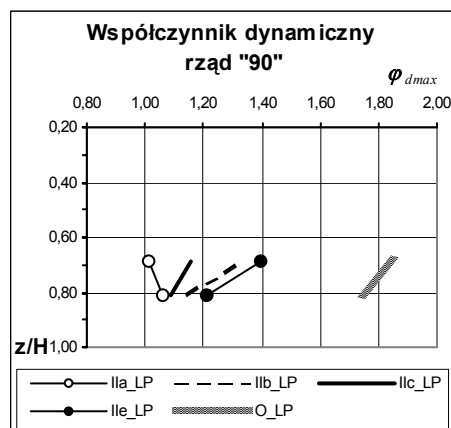
Rys. 5.28 Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP (rzad 0 i 45)



Rys. 5.29 Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP (rząd 90)



Rys. 5.30 Współczynnik dynamiczny – model II_LP (rząd 0 i 45)

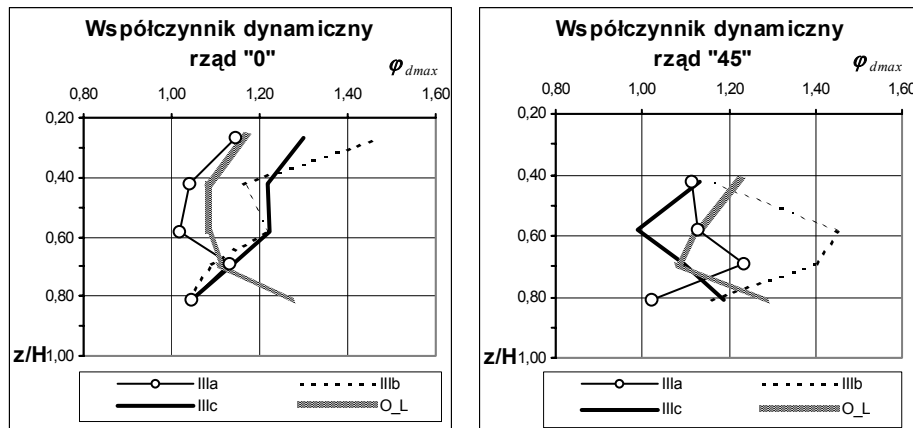


Rys. 5.31 Współczynnik dynamiczny – model II_LP (rząd 90)

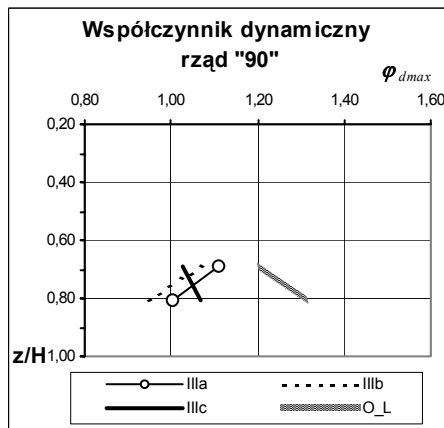
Poniżej umieszczono wykresy współczynnika dynamicznego dla jednoramiennych modeli III do V. Opróżnianie komory odbywało się tylko lewym otworem wysypowym, a porównawcze wykresy współczynnika dynamicznego w komorze bez przewodów zobrazowano, jak

poprzednio, krzywą koloru szarego (symbol 0_L). Odpowiednie litery po rzymskiej cyfrze oznaczającej typ modelu według rysunku 5.18 odnoszą się do typu perforacji według poniższego schematu:

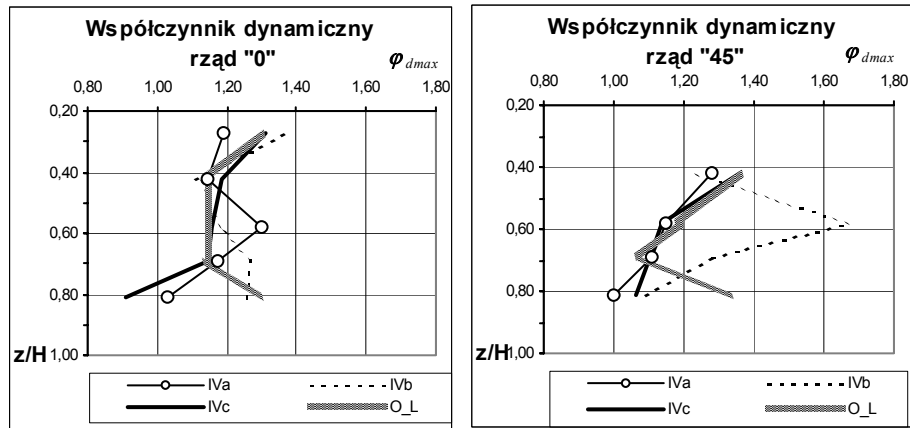
- a) przewód bez perforacji,
- b) przewód z perforacją maksymalną (stopień perforacji na poziomie 0,7 – patrz tablica 5.4),
- c) przewód z perforacją optymalną.



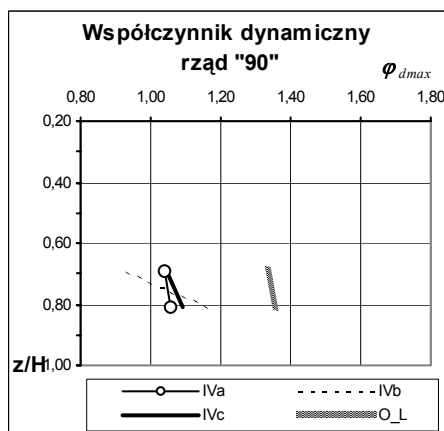
Rys. 5.32 Współczynnik dynamiczny – model III (rzęd 0 i 45)



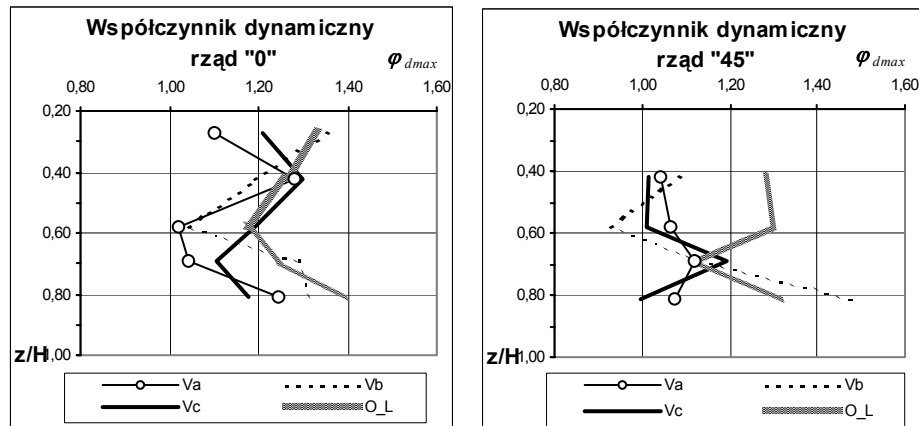
Rys. 5.33 Współczynnik dynamiczny – model III (rzęd 90)



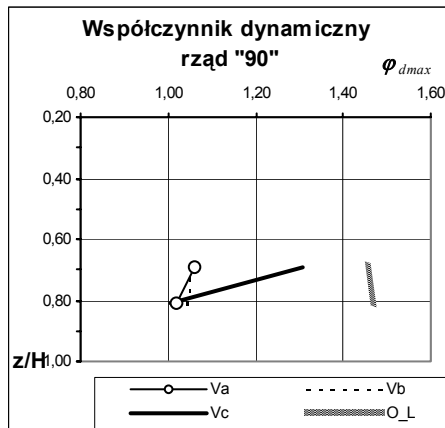
Rys. 5.34 Współczynnik dynamiczny – model IV (rzęd 0 i 45)



Rys. 5.35 Współczynnik dynamiczny – model IV (rzęd 90)

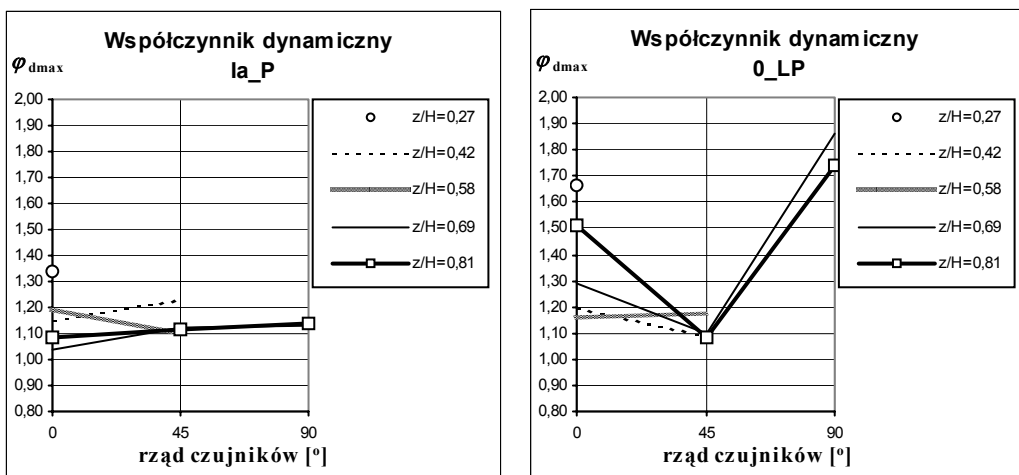


Rys. 5.36 Współczynnik dynamiczny – model V (rzęd 0 i 45)

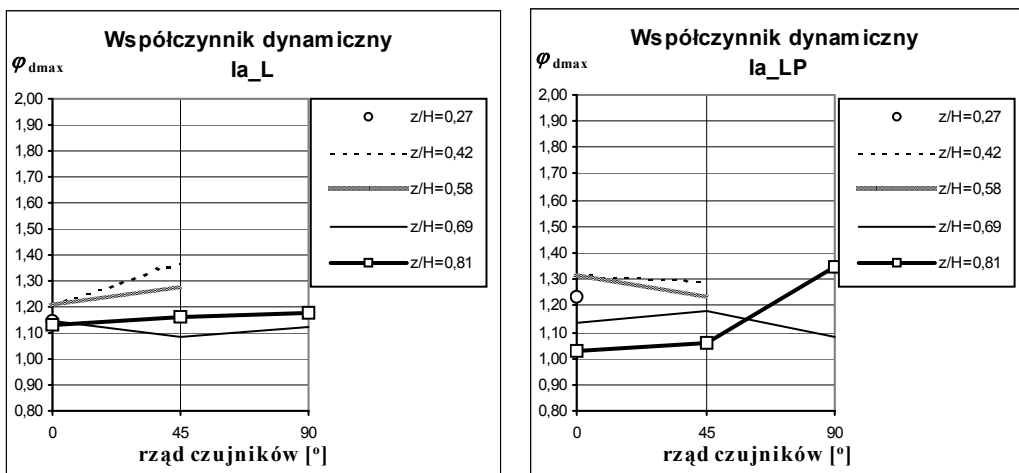


Rys. 5.37 Współczynnik dynamiczny – model V (rzęd 90)

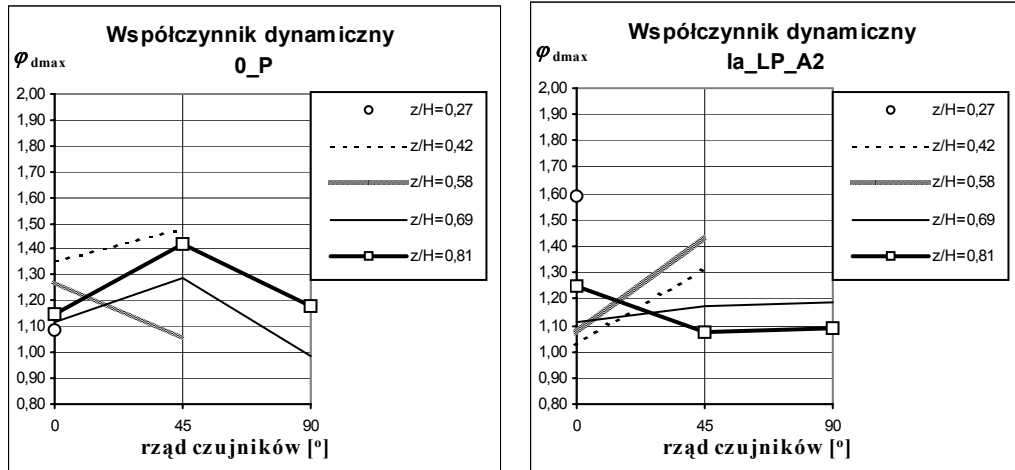
Na kolejnych wykresach zobrazowano współczynniki dynamiczne w szeregach poziomych odnoszących się do poziomów z/H .



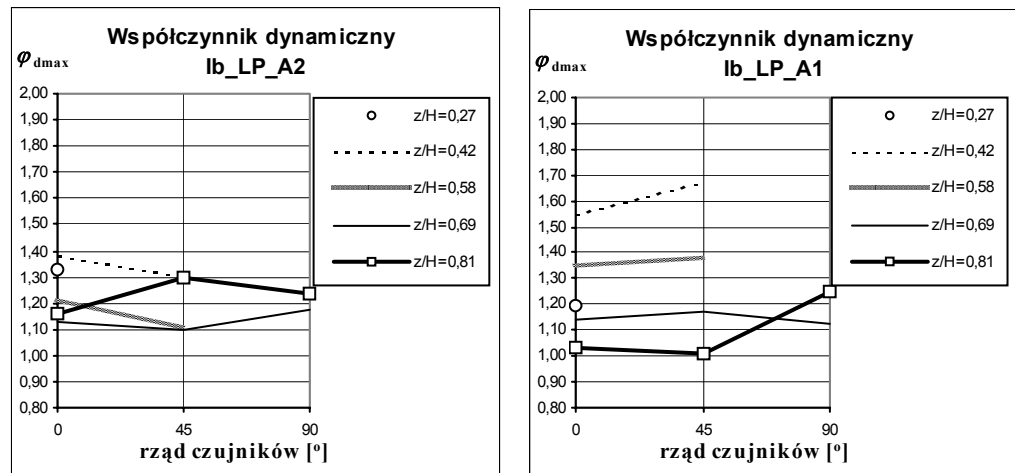
Rys. 5.38 Współczynnik dynamiczny – model Ia_LP i O_LP



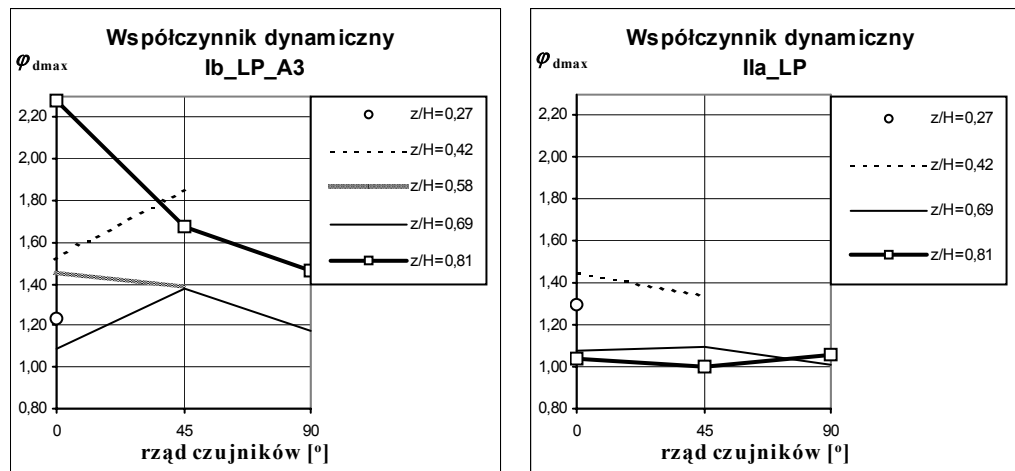
Rys. 5.39 Współczynnik dynamiczny – model Ia_L i Ia_LP



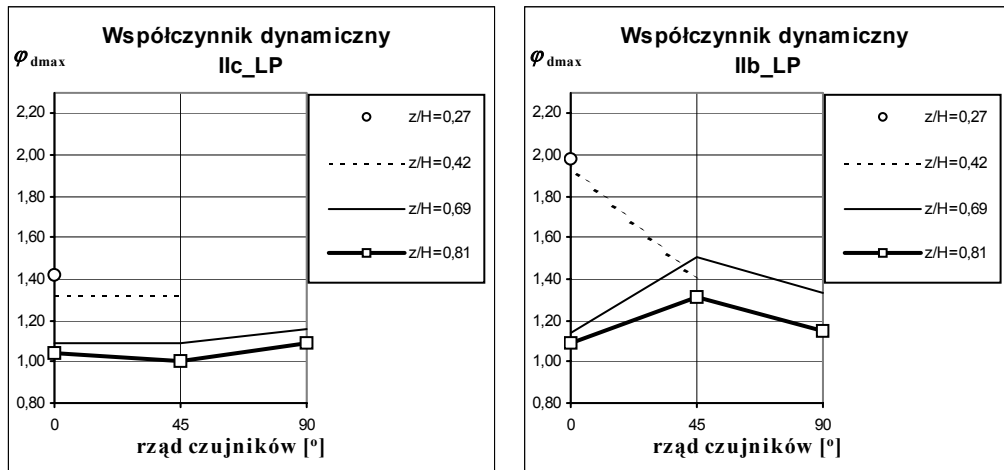
Rys. 5.40 Współczynnik dynamiczny – model 0_P i Ia_LP_A2



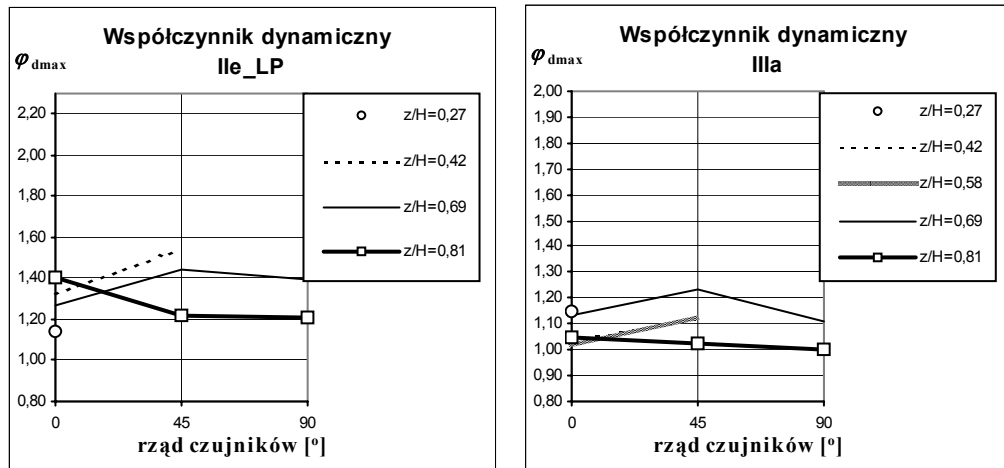
Rys. 5.41 Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP_A2 i Ib_LP_A1



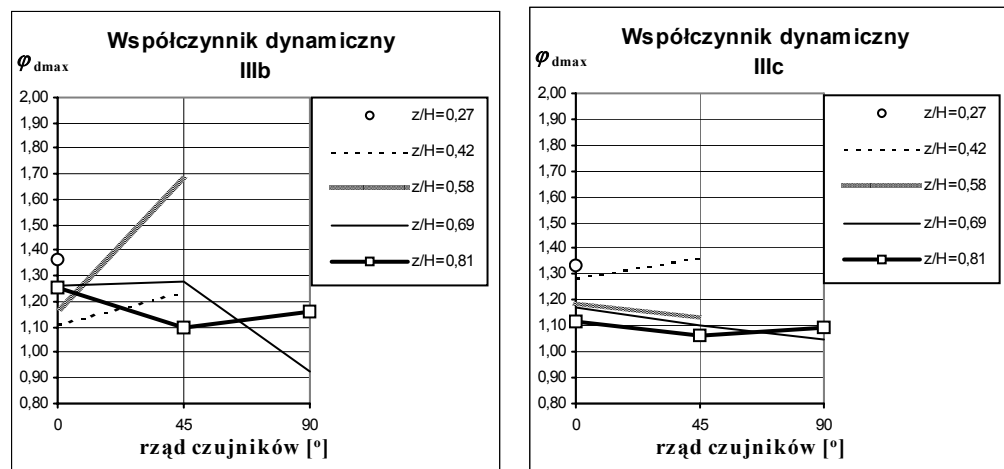
Rys. 5.42 Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP_A3 i IIa_LP



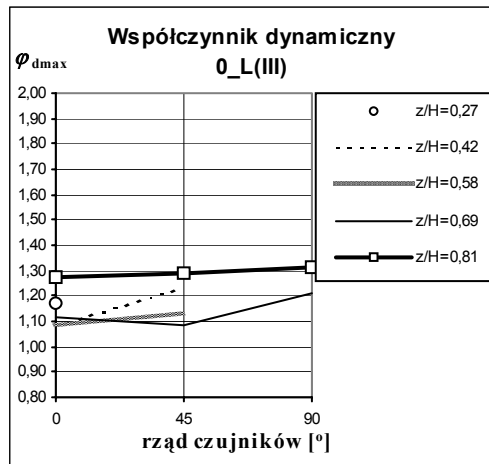
Rys. 5.43 Współczynnik dynamiczny – model IIc_LP i IIb_LP



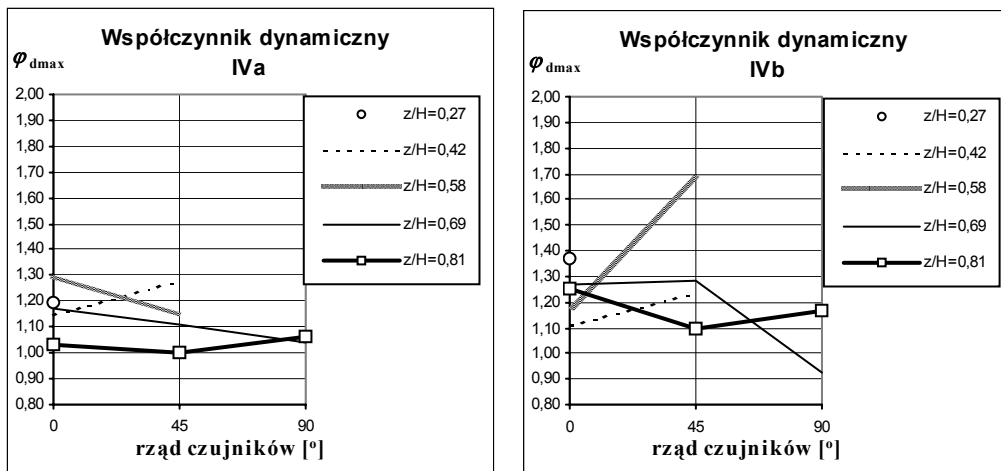
Rys. 5.44 Współczynnik dynamiczny – model IIe_LP i IIIa



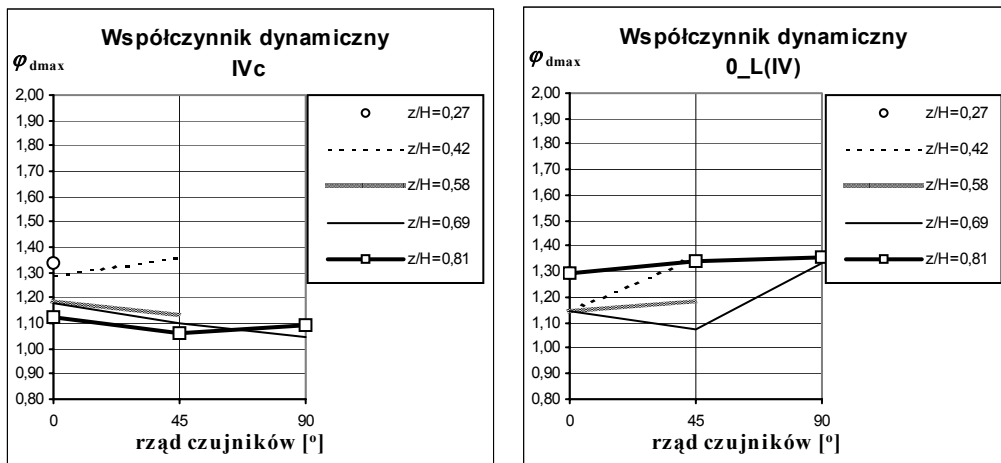
Rys. 5.45 Współczynnik dynamiczny – model IIIb i IIIc



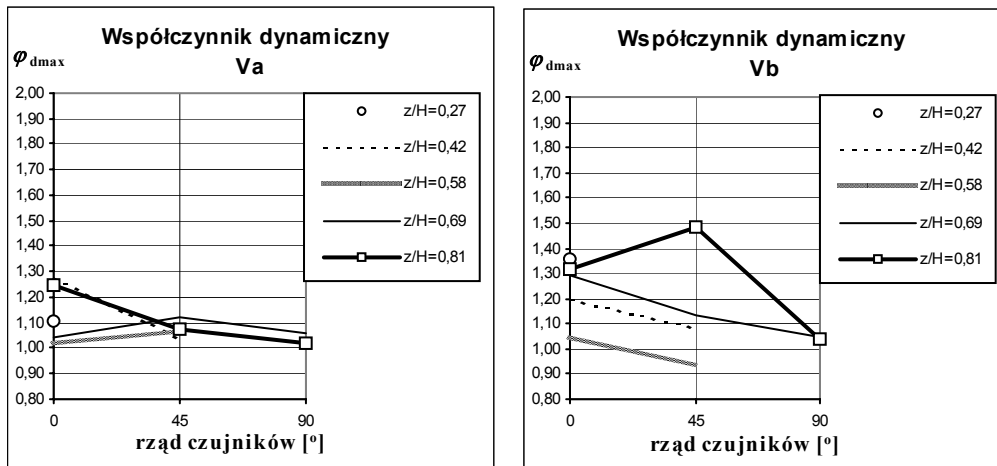
Rys. 5.46 Współczynnik dynamiczny – model 0_L(III)



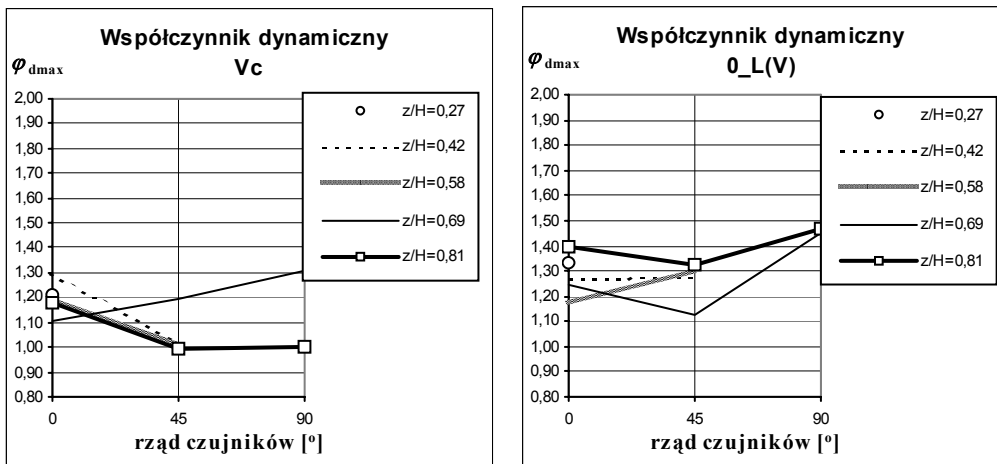
Rys. 5.47 Współczynnik dynamiczny – model IVa i IVb



Rys. 5.48 Współczynnik dynamiczny – model IVc i 0_L(IV)



Rys. 5.49 Współczynnik dynamiczny – model Va i Vb



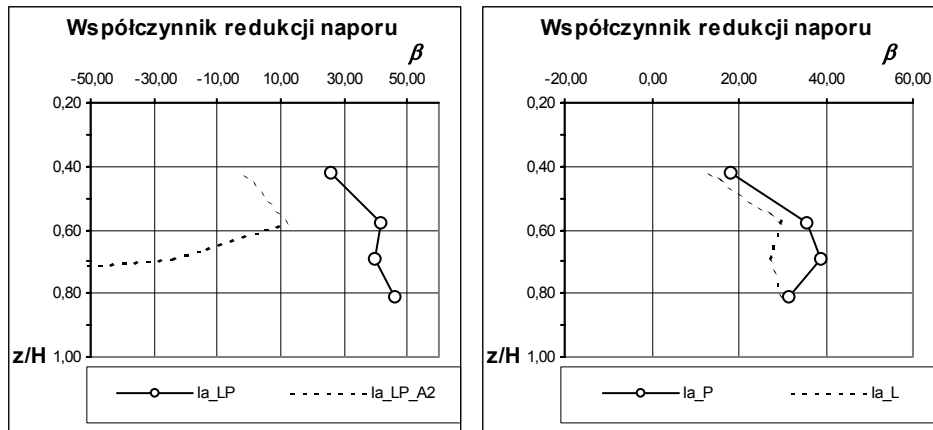
Rys. 5.50 Współczynnik dynamiczny – model Vc i 0_L(V)

Zobrazowanie nierównomierności rozkładu wartości współczynników dynamicznych uzyskano wprowadzając za pracę [26] stopień redukcji naporu dynamicznego β :

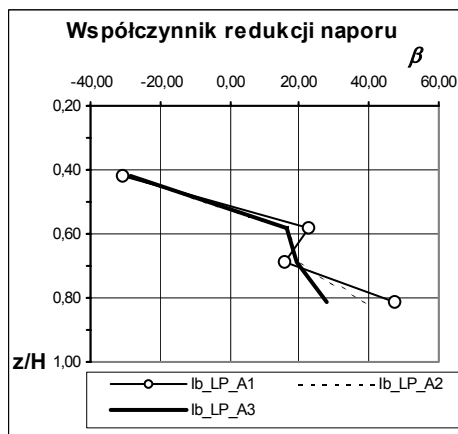
$$\beta_n = \left(1 - \frac{P_h^{din}}{P_h^{dn}} \right) \cdot 100\%, \quad (5.36)$$

gdzie: p_h^{din} – największy napór poziomy w trakcie opróżniania, na n -ym poziomie przy zastosowaniu i -tego przewodu odciążającego, kPa,

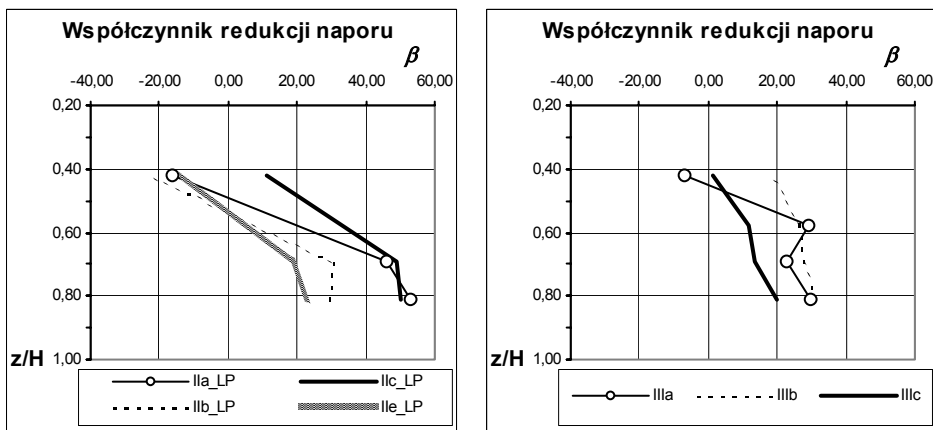
p_h^{dn} – największy napór poziomy w trakcie opróżniania, na n -ym poziomie w komorze opróżnianej tradycyjnie (bez przewodów odciążających), kPa.



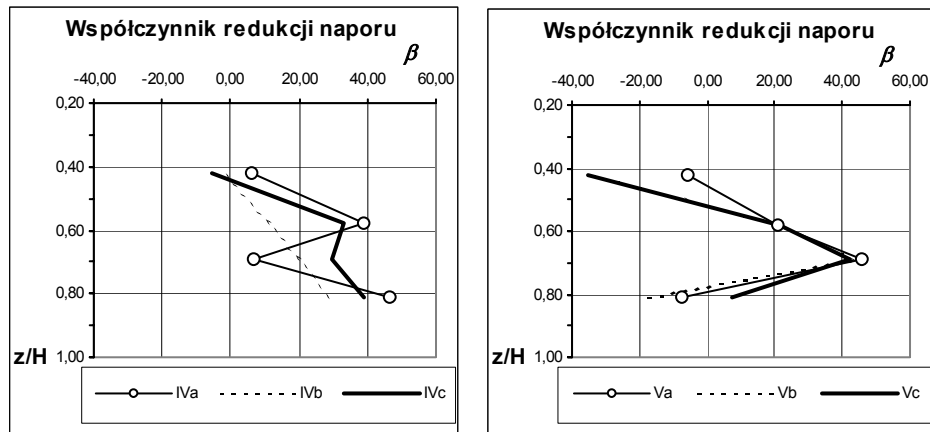
Rys. 5.51 Stopień redukcji naporu dynamicznego – model Ia



Rys. 5.52 Stopień redukcji naporu dynamicznego – model Ib



Rys. 5.53 Stopień redukcji naporu dynamicznego – model II i III



Rys. 5.54 Stopień redukcji naporu dynamicznego – model IV i V

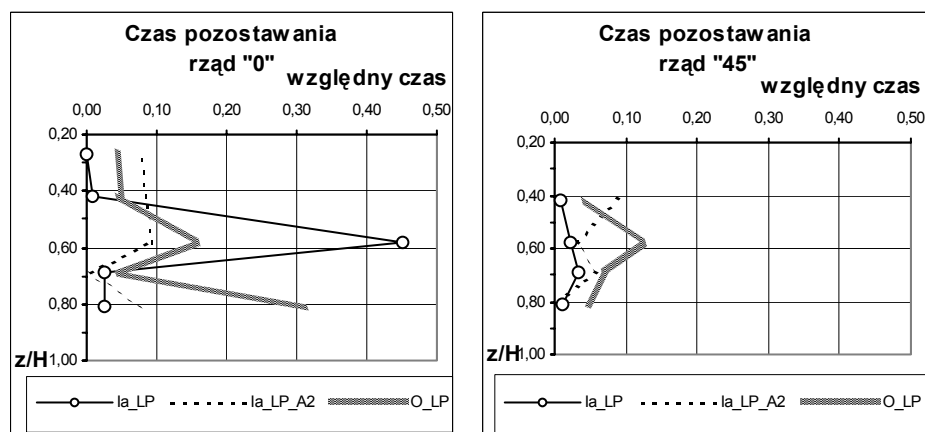
Poza porównywaniem wartości naporów analizowano również względny czas pozostawiania wartości ponadstatycznych naporów t_p działających na dany czujnik. Czas ten obliczany był następująco:

$$t_p = \frac{t_{dyn}}{t_{calc}}, \quad (5.37)$$

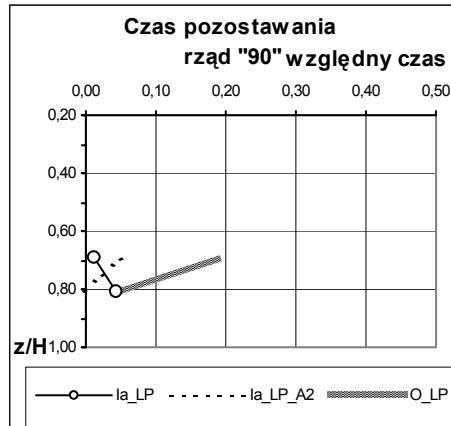
gdzie: t_{dyn} – czas liczony od początku opróżniania z utrzymującą się wartością naporu ponad wartość statyczną, godz.,

t_{calc} – całkowity czas opróżniania komory, godz.

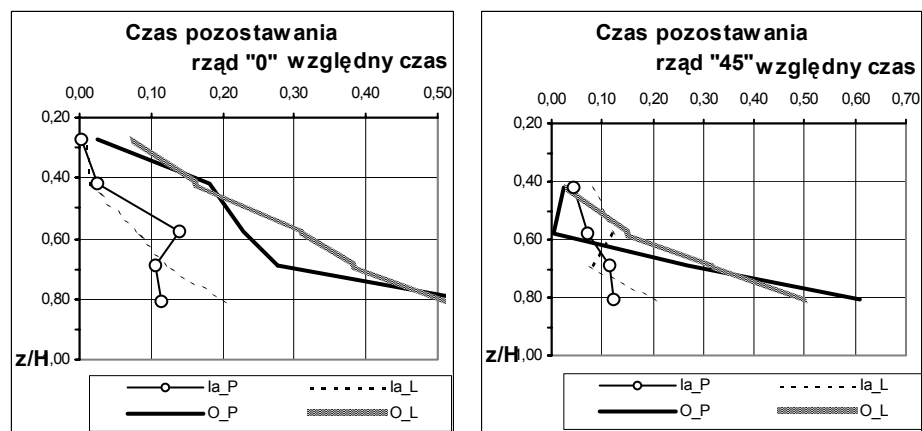
Porównanie wartości czasu pozostawiania dla czujników ściany dla różnych sposobów opróżniania przedstawiono na poniższych wykresach.



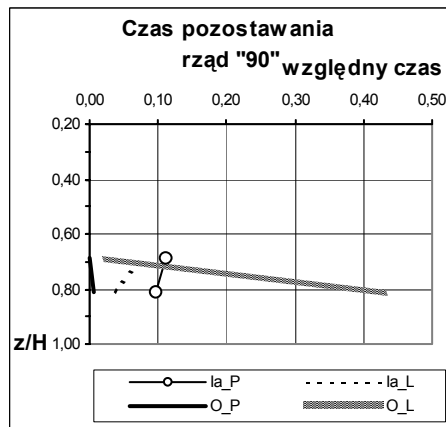
Rys. 5.55 Względny czas pozostawiania wartości ponadstatycznych – model Ia_LP (rzęd 0 i 45)



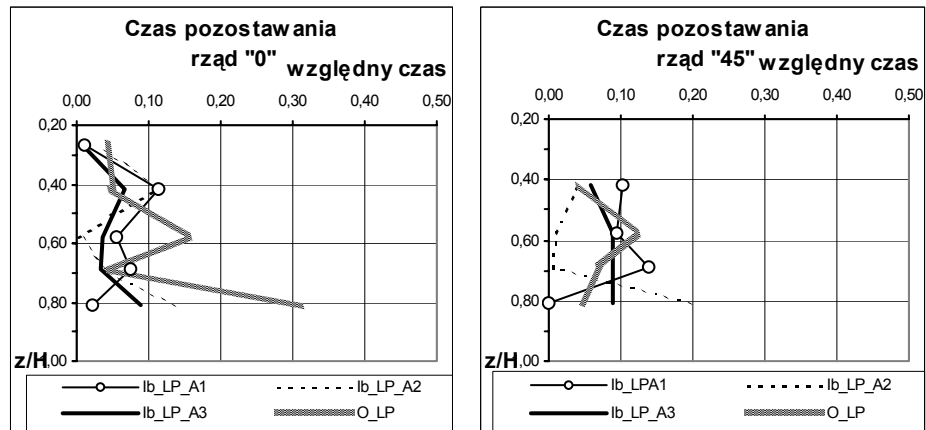
Rys. 5.56 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_LP (rząd 90)



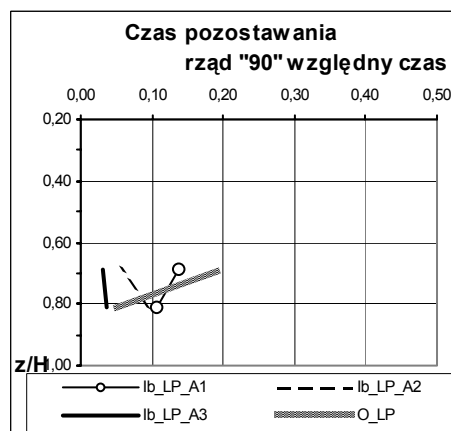
Rys. 5.57 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_L i Ia_P (rząd 0 i 45)



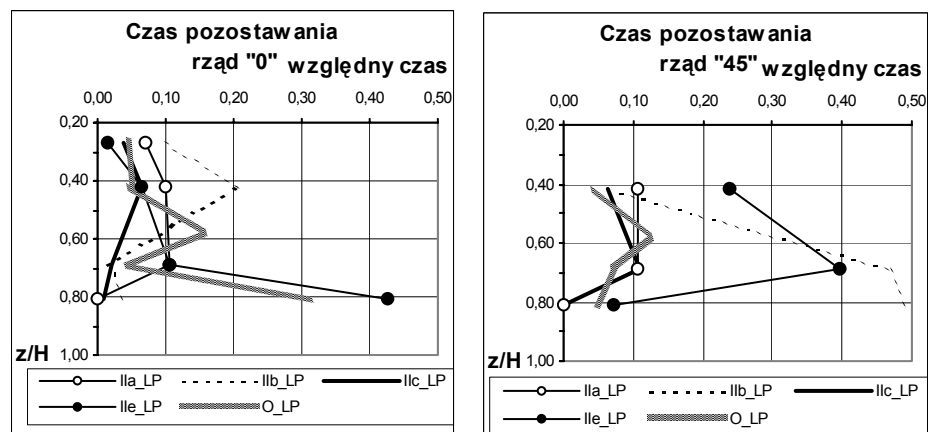
Rys. 5.58 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_L i Ia_P (rząd 90)



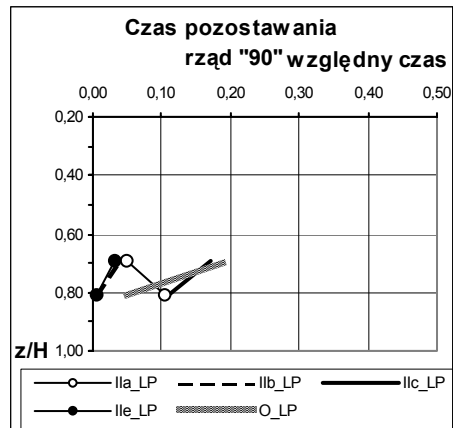
Rys. 5.59 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ib_LP (rzęd 0 i 45)



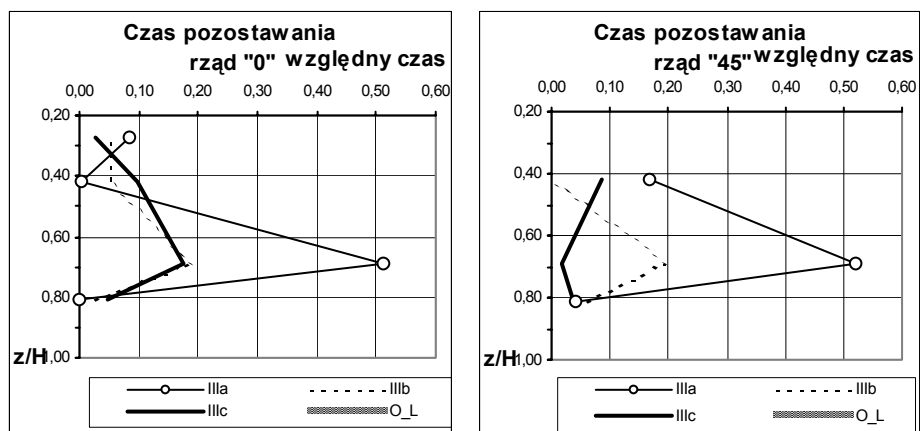
Rys. 5.60 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ib_LP (rzęd 90)



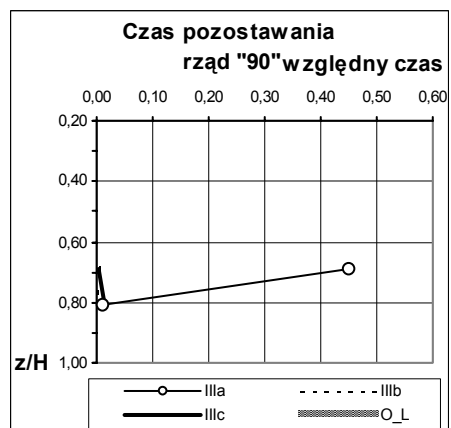
Rys. 5.61 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model II_LP (rzęd 0 i 45)



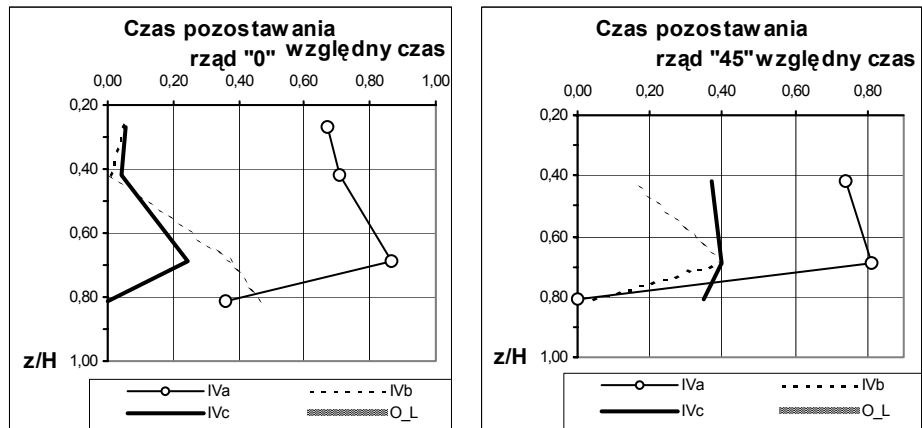
Rys. 5.62 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model II_LP (rzęd 90)



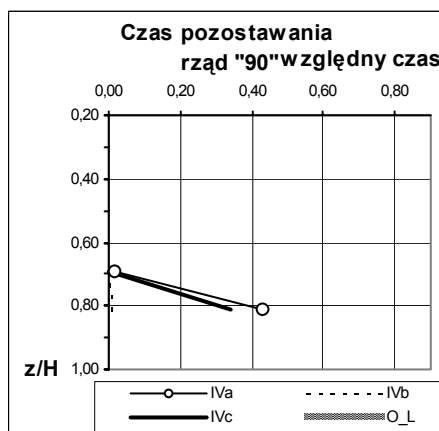
Rys. 5.63 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model III (rzęd 0 i 45)



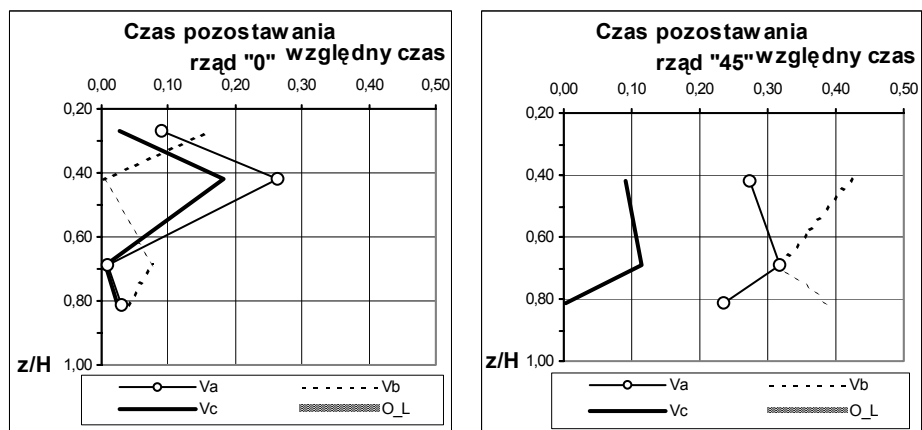
Rys. 5.64 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model III (rzęd 90)



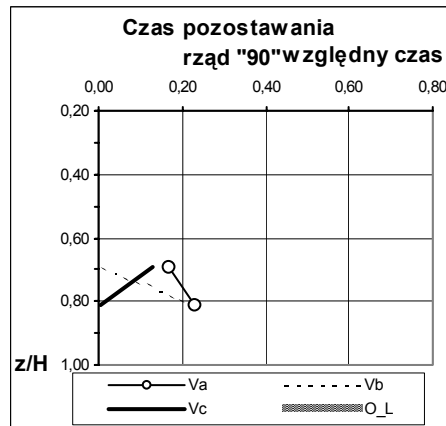
Rys. 5.65 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model IV (rzęd 0 i 45)



Rys. 5.66 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model IV (rzęd 90)



Rys. 5.67 Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model V (rzęd 0 i 45)



Rys. 5.68 Względny czas pozostawiania wartości ponadstatycznych – model V (rzęd 90)

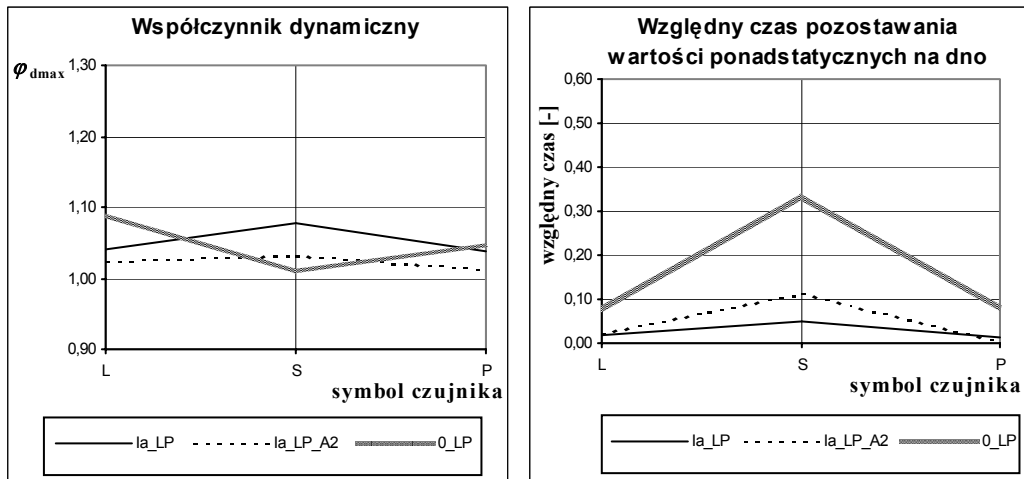
Z przedstawionych wykresów wynika, że opróżnianie komory przy użyciu przewodów odciążających powoduje redukcję naporu w dolnych strefach komory. Jednocześnie zaobserwowano nieznaczny wzrost współczynników dynamicznych w górnych partiach materiału. Wzrost ten występował najczęściej w rzędzie „45” i „90” i był największy dla modelu Ib, opróżnianego dwoma otworami, zasypywanego sposobem A3. Najmniejsze zaś wartości współczynników dynamicznych w porównaniu do tradycyjnego opróżniania zaobserwowano w rzędzie „0”.

Zaobserwowano zasadniczy wpływ rodzaju zasypywania komory na wartości współczynnika redukcji. I tak, zastosowanie sposobu A2 (patrz rys. 5.20 z opisem) skutkuje najmniejszymi wartościami współczynnika redukcji, zaś zasyp sposobem A1 (centralnie w kierunku środka komory) daje największe wartości współczynnika redukcji (do 50 %).

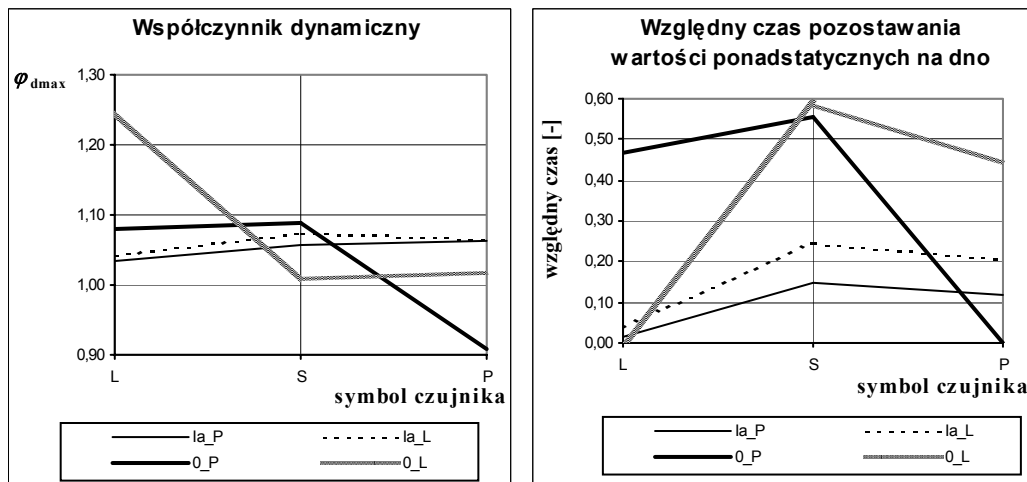
Dla modeli I do IV stwierdzono rosnącą redukcję naporu ku dołowi, natomiast w modelu V współczynnik redukcji maleje w najniższych partiach komory.

Równie interesujące są wartości względnego czasu pozostawiania wartości ponadstatycznych na dno. Wykresy obrazujące tę zależność oraz wartości współczynników dynamicznych dla dna przedstawiono na rysunkach poniżej (rys. 5.69 do 5.75). W dnie umieszczone były trzy czujniki naporu normalnego (patrz punkt 5.4.1 pracy).

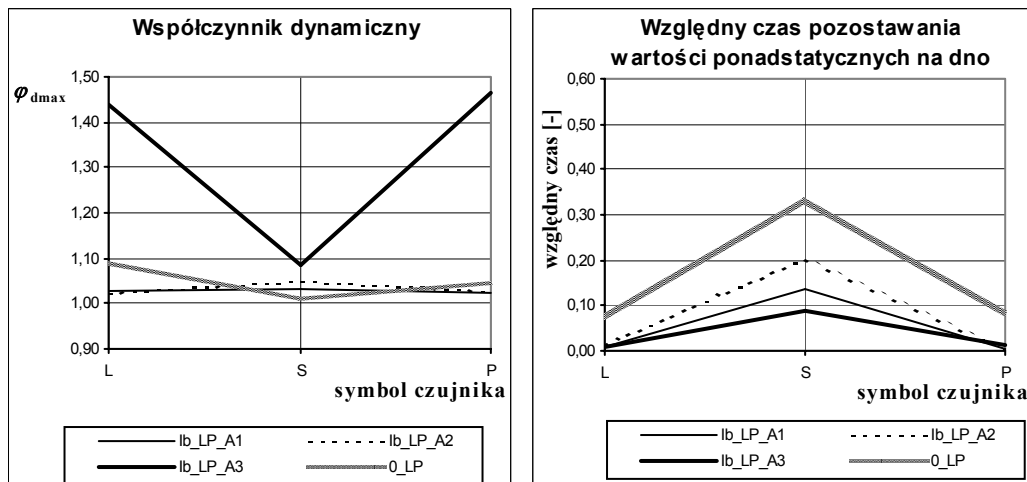
Z pierwszych dwóch wykresów wynika, że opróżnianie za pomocą dwóch otworów jednocześnie skutkuje symetrycznym rozkładem krzywych na wykresach, natomiast przy opróżnianiu jednostronnym szybciej zanikają napory ponadstatyczne po stronie otwartego otworu. Tłumaczy się to rozluźnieniem materiału w strefie otworu wysypowego i redystrybucją obciążenia ze względu na bliską obecność ściany komory.



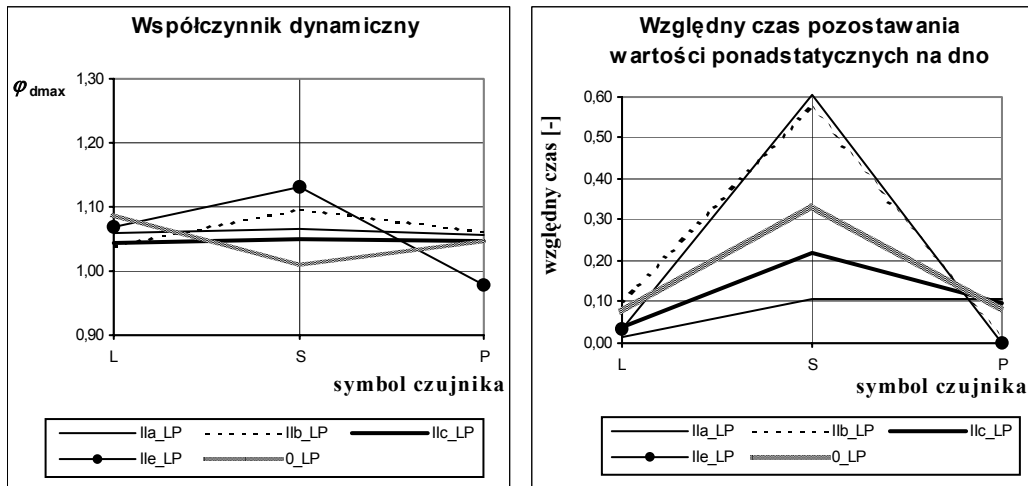
Rys. 5.69 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model Ia_LP



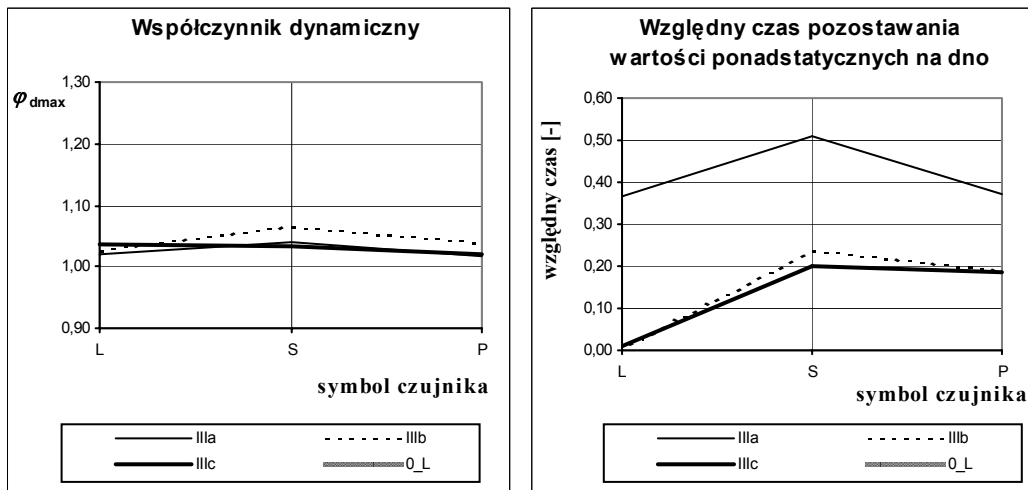
Rys. 5.70 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model Ia_L i Ia_P



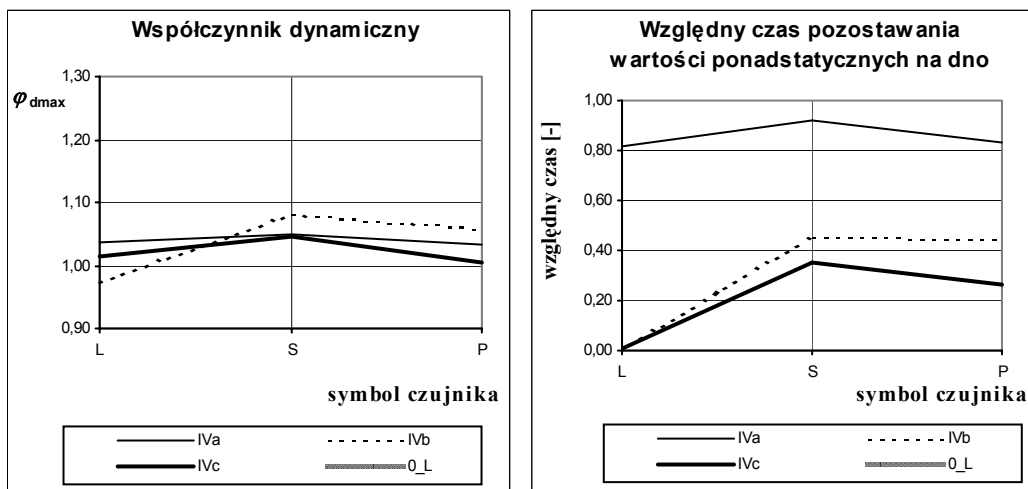
Rys. 5.71 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model Ib



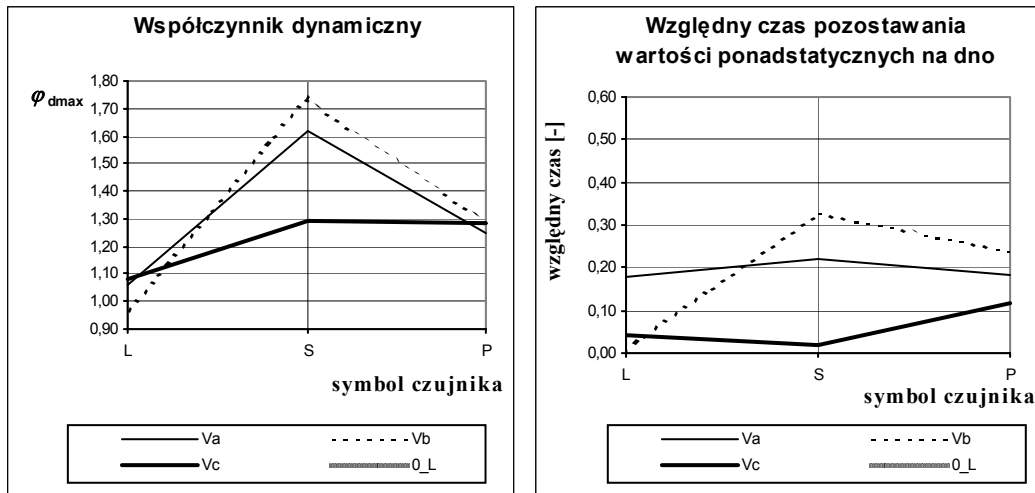
Rys. 5.72 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model II



Rys. 5.73 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model III



Rys. 5.74 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model IV



Rys. 5.75 Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model V

Przy opróżnianiu otworem środkowym najdłużej utrzymuje się ponadstatyczna wartość naporu na środkowym czujniku dna (ciągła gruba linia). Należy podkreślić, że taki rodzaj opróżniania nie występuje w silosie naturalnych rozmiarów, wyposażonym tylko w otwory usytuowane mimośrodowo. Zauważono natomiast bardzo małe wartości czasu pozostawania dla opróżniania otworami L+P (szara linia) i odpowiednio dla opróżniania osobno otworami L i P. Wniosek, jaki się nasuwa, to, że otwierając otwór usytuowany mimośrodowo względem środka komory, znajdujący się blisko danego czujnika w dnie, uzyskuje się najmniejsze wartości naporu na ten czujnik (względny czas $0,02 \div 0,04$). Najdłużej zaś wartości ponadstatyczne naporów utrzymują się na środkowym czujniku, również dla opróżniania mimośrodowymi otworami ($0,55 \div 0,70$ całkowitego czasu opróżniania).

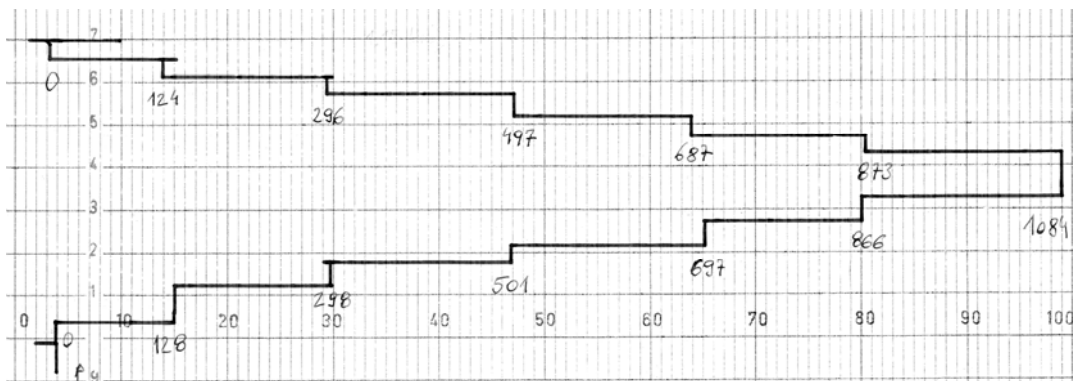
Wartości obciążenia globalnego i wartość redukcji (wzrostu) naporu w poszczególnych rzędach czujników przedstawiono w tabelicy 5.5. W tabelicy umieszczono również obciążenie globalne dna, obliczane jako suma wartości średnich naporów podczas początkowego okresu opróżniania. Maksymalna redukcja naporu globalnego działającego na ściany, w porównaniu do tradycyjnego opróżniania, osiągnięta została przy użyciu modelu IIc w rzędzie „0”, opróżnianym przy użyciu dwóch otworów jednocześnie i wyniosła 52,1 %. Maksymalny wzrost naporu globalnego zarejestrowano przy zastosowaniu modelu Ia w rzędzie „45”, zasypywanego sposobem A2. Wzrost ten przekroczył 100 % i wynosił 118,7 %. Obie wartości wyróżniono w tabelicy kolorem szarym. Równocześnie, dla wymienionych modeli (IIc i Ia), otrzymano największą redukcję i największy wzrost całkowitego naporu normalnego. I tak, redukcja całkowitego naporu wyniosła w modelu IIc 37,1 %, zaś wzrost w modelu Ia, napełnianym sposobem A2, wyniósł 75,4 %.

Tablica 5.5. Obciążenie globalne ściany i dna

Symbol modelu	Obciążenie globalne ściany								Obciążenie globalne dna	
	rząd 0		rząd 45		rząd 90		całkowite		wartość [kPa]	redukcja (wzrost) [%]
	wartość [kPa]	redukcja (wzrost) [%]	wartość [kPa]	redukcja (wzrost) [%]	wartość [kPa]	redukcja (wzrost) [%]	wartość [kPa]	redukcja (wzrost) [%]		
la_LP	4,75	47,9	4,40	35,1	3,35	-39,6	12,50	31,7	11,18	16,0
la_LP_A2	13,26	-45,4	14,83	-118,7	4,01	-67,1	32,10	-75,4	13,00	2,3
0_LP	9,12		6,78		2,40		18,30		13,31	
la_P	6,90	15,6	5,90	19,3	3,70	-48,6	16,50	8,2	12,83	1,5
la_L	8,08	1,2	5,46	25,3	4,08	-63,9	17,62	2,0	12,28	5,7
0_P	8,18		7,31		2,49		17,98		13,02	
0_L	8,18		8,17		4,36		20,71		13,65	
lb_LP_A1	8,49	6,9	5,42	20,1	3,54	-47,5	17,45	4,6	11,00	17,4
lb_LP_A2	8,35	8,4	6,20	8,6	3,86	-60,8	18,41	-0,6	11,29	15,2
lb_LP_A3	7,21	20,9	5,85	13,7	3,54	-47,5	16,60	9,3	12,52	5,9
0_LP	9,12		6,78		2,40		18,30		13,31	
IIa_LP	5,28	42,1	4,22	37,8	3,44	-43,3	12,94	29,3	11,68	12,2
IIb_LP	6,83	25,1	4,91	27,6	2,86	-19,2	14,60	20,2	11,17	16,1
IIc_LP	4,37	52,1	3,86	43,1	3,28	-36,7	11,51	37,1	12,37	7,1
Ile_LP	5,70	37,5	5,11	24,6	2,75	-14,6	13,56	25,9	12,08	9,2
0_LP	9,12		6,78		2,40		18,30		13,31	
IIIa	8,81	4,9	7,03	2,9	4,10	-25,8	19,94	-0,9	14,64	0,1
IIIb	8,65	6,6	6,11	15,6	2,63	19,3	17,39	12,0	14,33	2,2
IIIc	8,69	6,2	7,17	1,0	3,93	-20,6	19,79	-0,2	13,54	7,6
0_L	9,26		7,24		3,26		19,76		14,65	
IVa	9,30	5,8	6,34	15,9	4,05	-3,3	19,69	7,7	14,11	0,7
IVb	8,44	14,5	6,68	11,4	2,54	35,2	17,66	17,2	14,26	-0,4
IVc	9,91	-0,4	6,95	7,8	4,01	-2,3	20,87	2,2	14,19	0,1
0_L	9,87		7,54		3,92		21,33		14,21	
Va	7,02	33,4	13,31	9,9	6,11	-17,3	26,44	13,4	13,94	2,2
Vb	8,81	16,4	13,34	9,7	6,89	-32,2	29,04	4,9	14,83	-4,0
Vc	8,84	16,1	13,25	10,4	6,01	-15,4	28,10	8,0	14,99	-5,1
0_L	10,54		14,78		5,21		30,53		14,26	

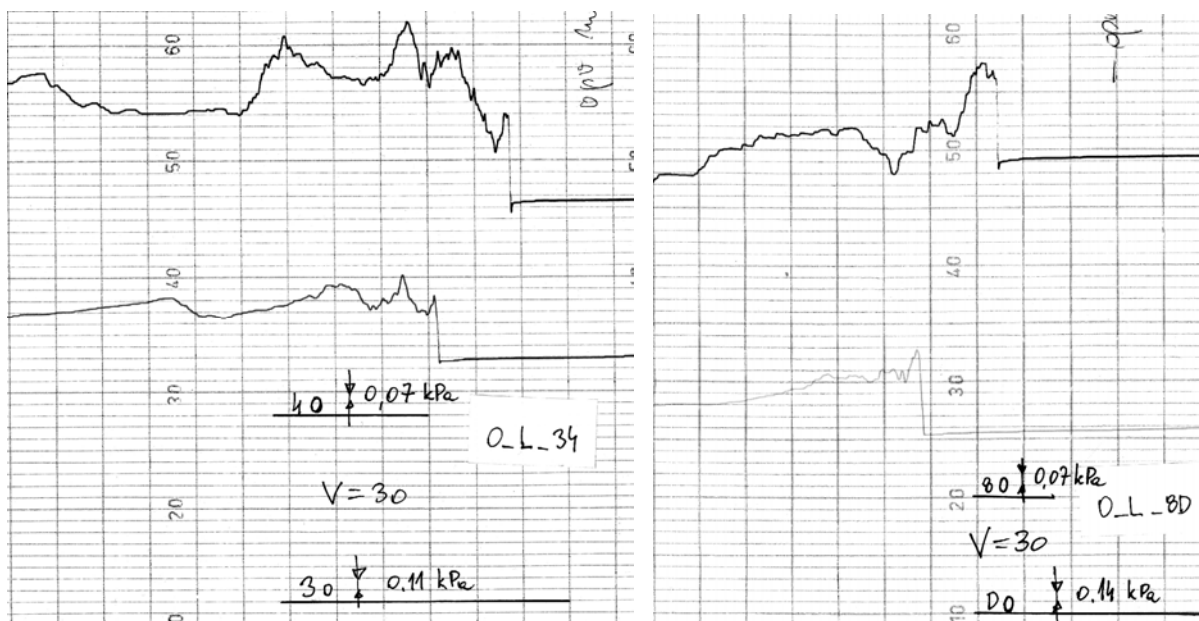
Ogólnie można stwierdzić, że najbardziej korzystnie wpływa na zmniejszenie naporu globalnego na dno zastosowanie przewodów mniejszych średnic (model Ib i II), natomiast przy opróżnianiu komory przewodami większych średnic (III, IV i V) stwierdzono zwiększenie naporu globalnego na dno – większe wartości towarzyszą większej średnicy przewodu.

Rejestratorem analogowym dokonano zapisu przebiegu naporu w czasie opróżniania komory z przewodem typu V i bez przewodu. Przykładową kalibrację czujnika nr 3, wykonaną na rejestratorze analogowym, przedstawiono na rysunku 5.76. W pomiarach użyto czterech czujników naporu umieszczonych w następującym porządku: rząd „0” – czujniki 4 ($z/H = 0,58$), 3 ($z/H = 0,69$), D ($z/H = 0,81$), rząd „45” czujnik 8 ($z/H = 0,81$).

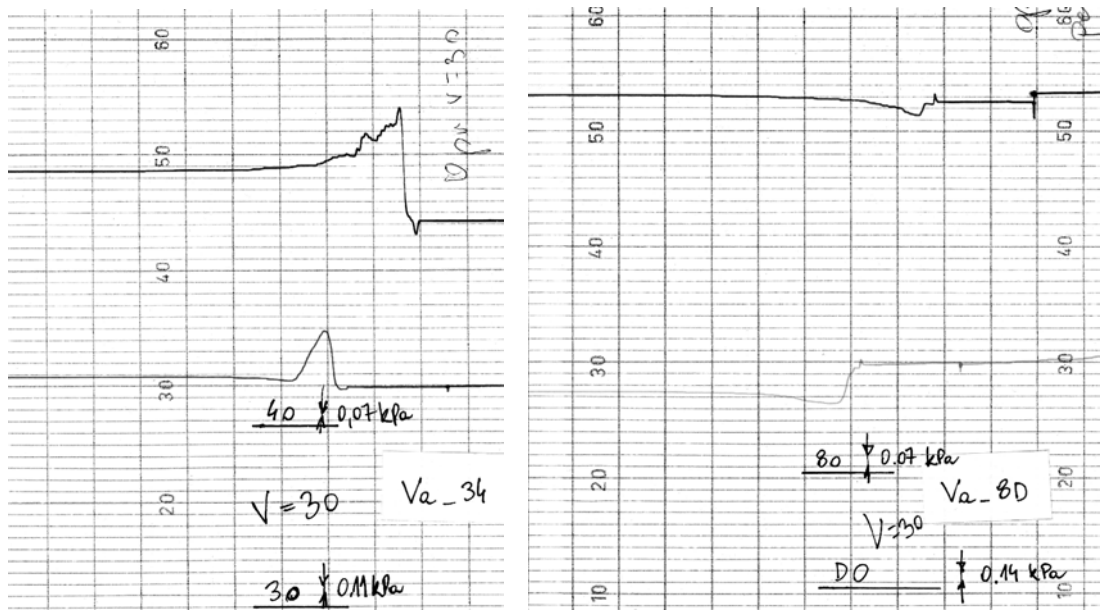


Rys. 5.76. Kalibracja czujnika nr 3 w zakresie 10 kPa na rejestratorze analogowym, przy użyciu słupa wody; cyframi oznaczono ciśnienie w $[\text{Pa}] \cdot 10^1$

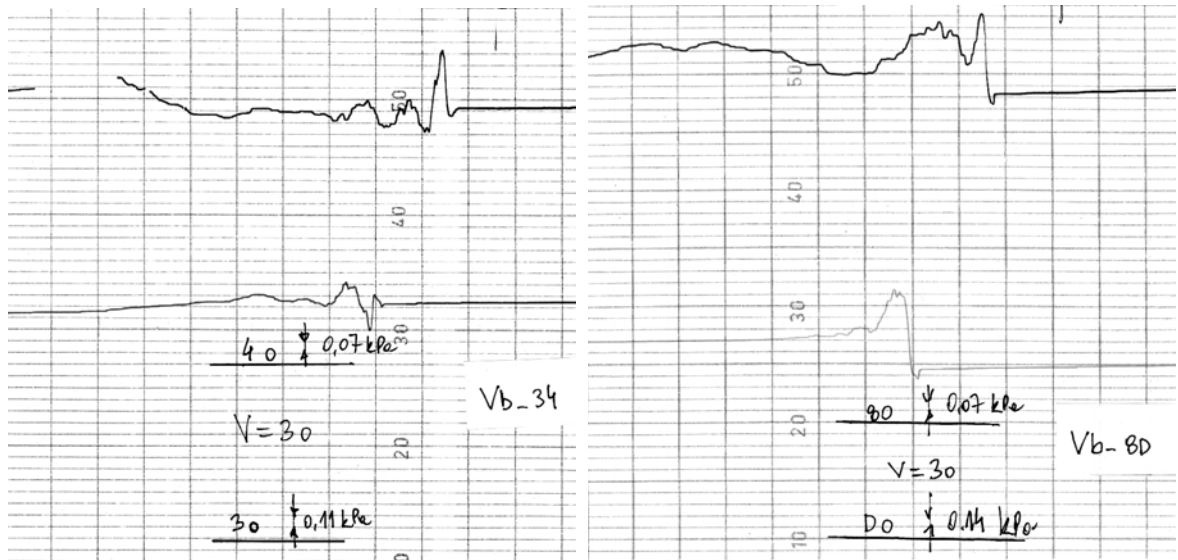
Poniższe rysunki (rys. 5.77 do 5.80) przedstawiają wyniki wybranych zapisów. Rejestrowanie odbywało się z prędkością taśmy $v = 30 \text{ cm/min}$ (jedna działka pozioma taśmy to $1 \text{ cm} = 2 \text{ sek.}$). Podziałkę wartości naporów i poziom „0” dla poszczególnych czujników zamieszczono na każdym wykresie.



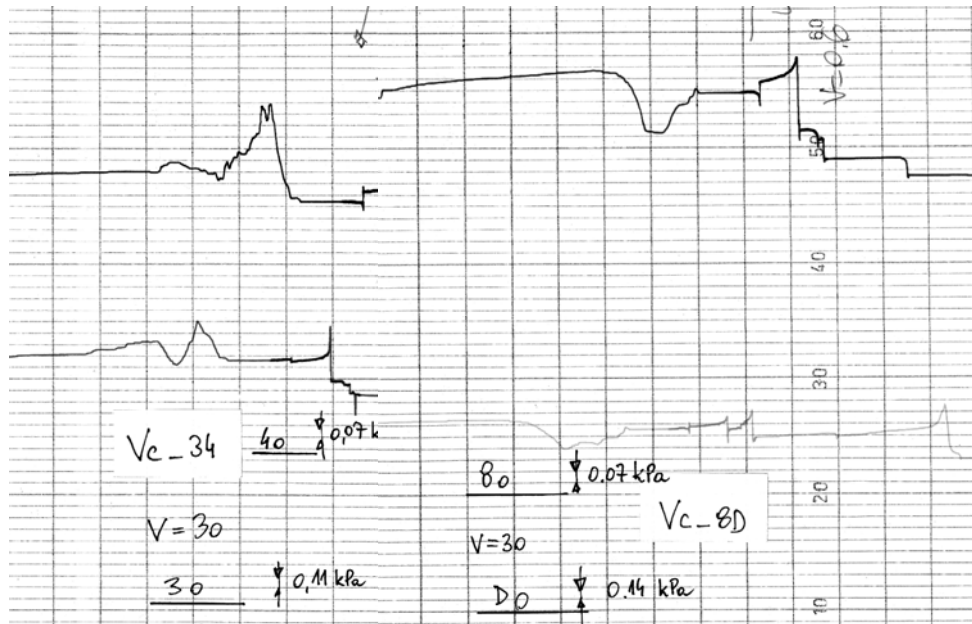
Rys. 5.77 Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model 0_L)



Rys.5.78 Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model Va)



Rys. 5.79 Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model Vb)



Rys. 5.80 Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model Vc)

W tabelicy 5.6 zestawiono charakterystyczne wartości naporów wraz z obliczonymi współczynnikami dynamicznymi, otrzymane dla poszczególnych czujników (z podaniem rzędnej czujnika).

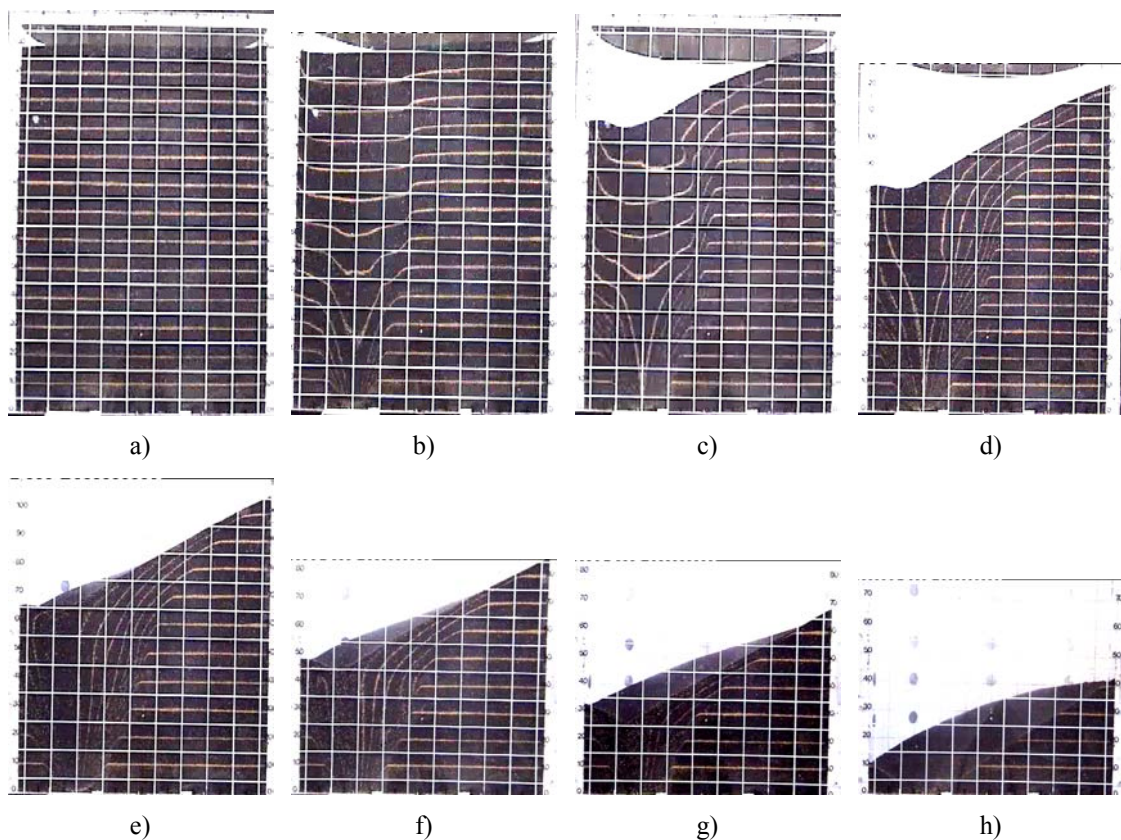
Tablica 5.6 Zestawienie wyników z rejestratora analogowego

Symbol modelu	Czujnik 3 (z/H = 0,69)			Czujnik 4 (z/H = 0,58)			Czujnik 8 (z/H = 0,81)			Czujnik D (z/H = 0,81)		
	ρ_{hn}	ρ_{hd}	φ_{dmax}	ρ_{hn}	ρ_{hd}	φ_{dmax}	ρ_{hn}	ρ_{hd}	φ_{dmax}	ρ_{hn}	ρ_{hd}	φ_{dmax}
	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]	[kPa]	[-]
Va	2,20	2,75	1,25	1,23	1,93	1,57	2,31	2,24	0,97	2,73	2,31	0,85
Vb	2,26	2,42	1,07	1,54	1,89	1,23	1,96	2,45	1,25	2,10	2,94	1,40
Vc	2,31	2,64	1,14	1,47	2,03	1,38	2,45	2,17	0,89	1,96	1,75	0,89
O_L	2,31	3,08	1,33	1,30	2,38	1,84	2,03	2,59	1,28	2,24	3,22	1,44

Z analizy wyników wynika, że przez zastosowanie jednogłęziowego przewodu odciążającego, uzyskuje się redukcję wartości współczynników dynamicznych w dolnych partiach komory – na tych poziomach, które znajdują się poniżej górnego końca przewodu. Prawdliwość ta została też potwierdzona we wcześniejszych rezultatach, otrzymanych z pomiarów mostkiem. Największa redukcja w komorze z przewodem występuje w najniższym poziomie pomiarowym (z/H = 0,81). Najbardziej intensywne pulsacje uzyskano w przypadku opróżniania bez przewodu (O_L), zaś minimalne pulsowanie naporu zaobserwowano w modelu Va (przewód bez perforacji). Wyniki te potwierdzają odciążający charakter przewodów i zmniejszający pulsacje korzystny wpływ na napór w komorze.

5.9.2 Obraz przepływu

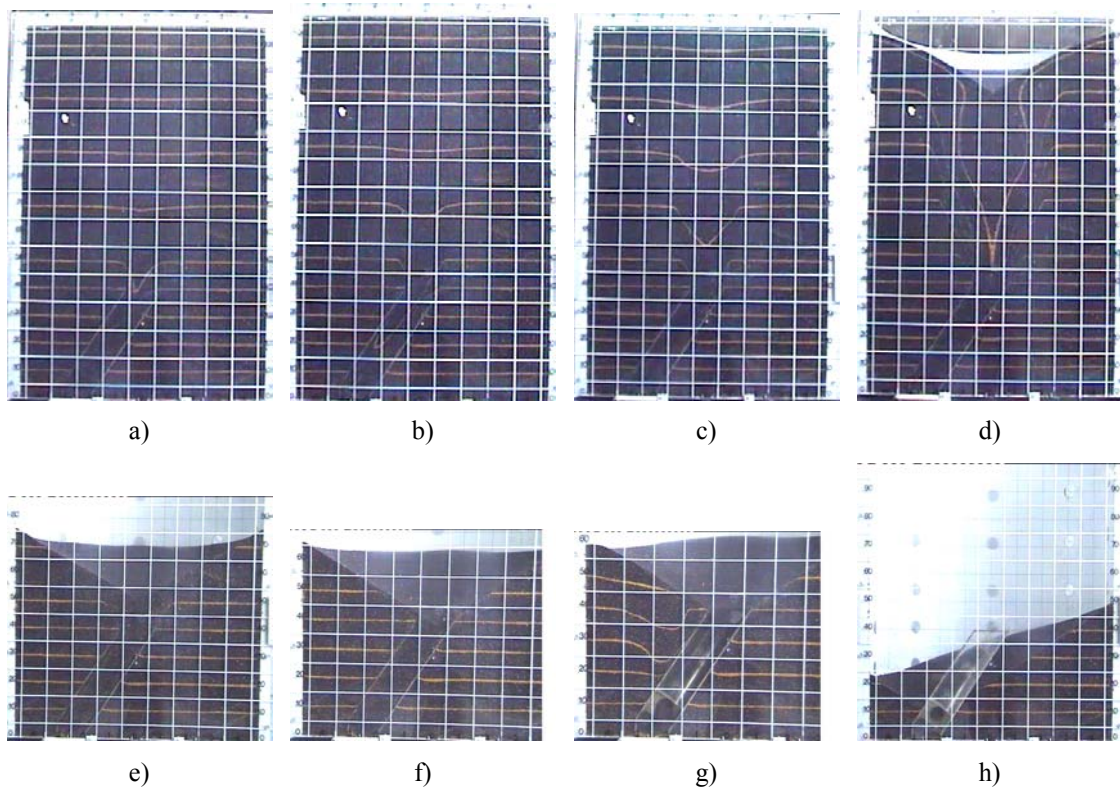
Obrazy przepływu rejestrowane kamerą i aparatem cyfrowym miały na celu utrwalenie i analizę charakterystycznych cech przepływu możliwych do zaobserwowania przez przezroczystą przednią ścianę modelu badawczego. Wykonanie przewodów w formie połówek rur umożliwiło obserwację przepływu przez przewody. Z utrwalonych w formie filmu przepływów zaprezentowano sekwencje wybranych klatek. Na rysunku 5.81 przedstawiono obrazy przepływu w komorze bez przewodów, opróżnianej lewym otworem wysypowym.



Rys. 5.81 Obrazy przepływu w komorze opróżnianej tradycyjnie

Podczas napełniania komory utworzono poziome przewarstwienia z materiału kontrastującego (gorczycy). Ułatwiało to wizualizację lokalnych stref ścinania. W czasie napełniania nie zaobserwowano widocznych przemieszczeń ziarna w dolnych warstwach pod wpływem obciążenia konsolidacyjnego wyższych warstw. W przepływie można rozróżnić dwie fazy. Faza pierwsza (formowania kanału przepływu) trwa do momentu wprowadzenia w ruch wszystkich cząstek z najwyższej górnej warstwy złoża. Fazie tej odpowiadają rysunki *a*, *b* i *c*. W dolnych warstwach złoża uformował się smukły słup poruszającego się materiału, a

wyższe warstwy osiadają bez przerwania dolnej elipsoidy kanału (ciągłe linie przewarstwień). Kolejną zaobserwowaną fazą przepływu jest stan, kiedy wszystkie cząstki przemieszczają się kanałem, w którym strefy ścinania są niewielkie, a ruch powodują siły normalne (rysunki *d*, *e*, *f* i *g*). Ponadto w środkowej części komory, tj. od wysokości ok. 30 cm, licząc od dołu, do ok. 95 cm, występują wyraźne strefy ścinania, co potwierdza, że przepływ jest lejowy. Zastosowanie przewodu odciążającego w formie jednostronnego rękawa z perforacją owocuje centrowaniem przepływu, ale tylko pod warunkiem prawidłowego zaprojektowania perforacji. Zobrazowaniem powyższego stwierdzenia są poniższe rysunki 5.82 i 5.83. Na rysunku 5.82 zestawiono fazy przepływu w komorze z prawidłowo zaprojektowanym przewodem (model Vc – patrz pkt 5.8), a na rysunku 5.83 z przewodem z za dużą perforacją (model IVb).

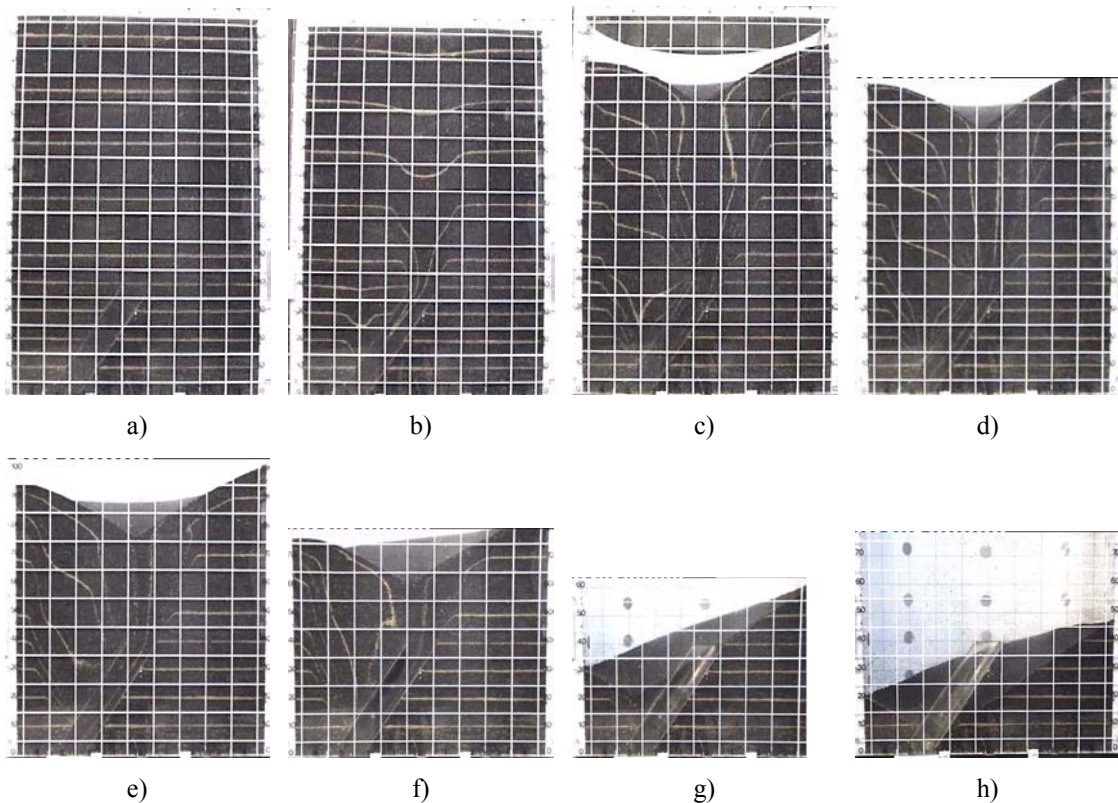


Rys. 5.82 Obrazy przepływu w komorze z jednostronnym przewodem Vc

Strefa deformacji złoża w przepływie z prawidłowo zaprojektowanym przewodem ograniczona jest do środkowej, centralnej części komory (rysunek 5.82 c i d), a jej szerokość nie przekracza 50 cm, co odpowiada 0,53 szerokości komory. Rdzeń przepływu w pobliżu frontowej ściany komory ma kształt zbliżony do elipsy, bez wyraźnych stref ścinania na granicy rdzenia. Warstwy kontrastujące znajdujące się poza rdzeniem przepływu nie ulegają deformacjom w pierwszej fazie opróżniania (rys. 5.82a, b, c, d i e), co świadczy o

prawidłowym przebiegu opróżniania z przepływem rdzeniowym. W drugiej fazie przepływu, która rozpoczyna się w momencie opróżnienia przewodu z równoczesnym „włączeniem się” otworu perforacyjnego na pobocznicy, obserwowane są osiadania warstw kontrastujących bezpośrednio nad otworem. W fazie tej opróżnianie odbywa się przez perforację, ku otworowi w dnie. Widoczne na rysunku 5.82h strefy martwe spowodowane są geometrią modelu (płaskie dno).

Zupełnie odmienny charakter przepływu zaobserwowano w komorze z podobnym przewodem odciążającym, lecz wyposażonym w otwór perforacyjny o znacznie większych wymiarach niż w przypadku na rysunku 5.82. Obrazy przepływu w komorze z przewodem wadliwym widoczne są na rysunku 5.83.



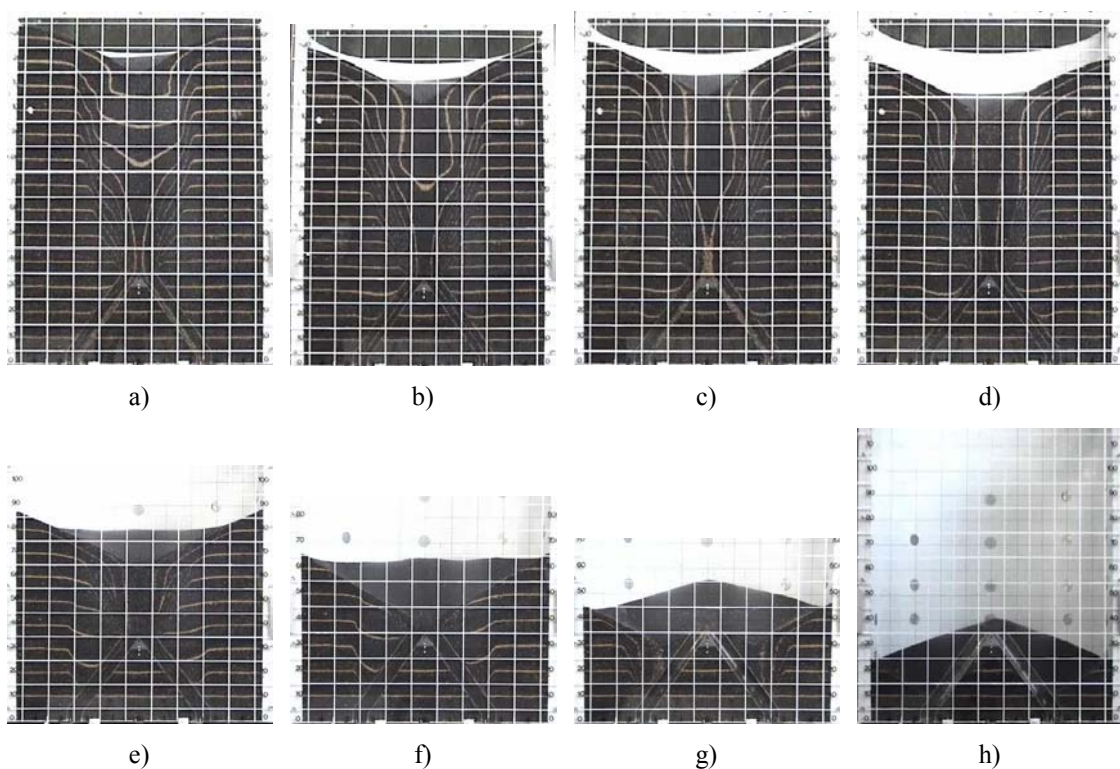
Rys. 5.83 Obrazy przepływu w komorze opróżnianej jednostronnym przewodem typu IVc

Po napełnieniu (rys. 5.83a) warstwy kontrastujące ułożone są poziomo co 10 cm w dolnej części i co 20 cm w części górnej komory. W chwili otwarcia otworu wysypowego następuje równoczesne tworzenie dwóch niezależnych rdzeni przepływu (rys. 5.83b i c), które w następnej fazie nachodząc na siebie tworzą skomplikowany, rozległy kanał przepływu (rys. 5.83d i e) z wyraźnymi strefami ścinania przy ścianie z lewej strony. Intensywny ruch w pobliżu perforacji spowodował rozszerzenie kanału przepływu na całą lewą część komory, nie

licząc niewielkich stref martwych po tej stronie. Na rysunku 5.83f widoczna jest pustka w górnej części nachylonego przewodu, spowodowana to dużą prędkością przepływu. Dokładna analiza zjawiska opisana jest w punkcie 5.9.5 pracy.

Głównym kryterium oceny poprawności działania przewodów na podstawie obserwacji było stwierdzenie braku ruchu w obrębie perforacji. Można stwierdzić zatem, że wielkość otworu, jego położenie i kształt są równie istotne jak podstawowe parametry geometryczne przewodu (średnica, kąt nachylenia, wysokość).

Podczas badań zarejestrowano również przepływ w komorze z dwuramiennym przewodem odciążającym (rys. 5.84).



Rys. 5.84 Obrazy przepływu w komorze opróżnianej jednostronnym przewodem typu II

Charakter zmian w czasie opróżniania komory przy użyciu dwuramiennego przewodu jest podobny do przepływu z przewodem Vc (rys. 5.82). Szerokość kanału przepływu umieszczonego centralnie w środku komory wynosi 50 cm (rys. 5.84c), a jego kształt zbliżony jest do elipsoidy. W dolnej strefie komory, w pobliżu otworów perforacyjnych występuje niewielki ruch materiału ku dołowi (5.84e, f), ale całkowite jego przemieszczenie wynosi ok. 10 cm w ciągu całego procesu opróżniania. Średnice zastosowanych otworów są o kilka procent większe niż optymalne, przy których nie występuje podciąganie.

5.9.3 Obciążenia przewodów odciążających

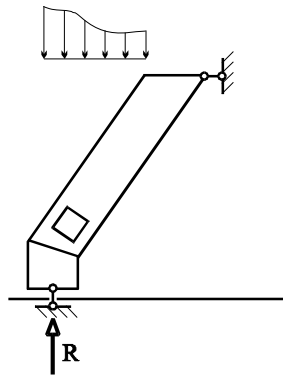
Podczas badań mierzono parcie na czujniki tensometryczne umieszczone w rurze. Dzięki specjalnej konstrukcji pozwalały one na obustronny pomiar parcia. Otrzymane w ten sposób wartości średnie naporów zestawiono w tabelicy 5.7.

Tablica 5.7 Zestawienie naporów działających na przewód

symbol modelu	czujniki na zewnątrz przewodu			czujniki wewnątrz przewodu		
	1	2	3	1	2	3
	z/H=0,78	z/H=0,85	z/H=0,92	z/H=0,78	z/H=0,85	z/H=0,92
	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
Ia_LP	1,92	3,72	5,77	0,86	0,52	0,26
Ia_LP_A2	1,87	3,46	4,51	0,55	0,64	0,33
Ia_P	1,48	2,73	5,86	0,46	0,30	0,22
Ia_L	1,22	3,30	7,33	0,75	0,34	0,22
IIa_LP	2,00	2,46	5,33	0,72	0,50	0,29
IIb_LP	1,90	2,31	4,61	0,71	0,32	0,27
IIc_LP	1,72	3,40	6,56	0,69	0,74	0,39
Ile_LP	1,48	3,65	6,44	0,74	0,67	0,24
IVa	1,37	3,80	5,44	0,74	0,64	0,32
IVb	2,36	2,71	6,27	0,84	0,57	0,38
IVc	1,41	3,62	4,79	0,62	0,59	0,29

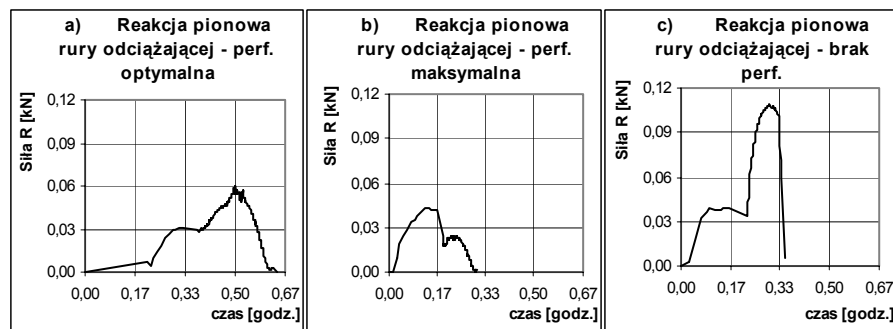
Z pomiarów naporu działającego na przewody od zewnątrz i w środku wynika, że rodzaj perforacji nie ma zasadniczego wpływu na wartości naporów. Napór na zewnątrz przewodu ma wartości i rozkład podobne do naporu działającego na ściany, tzn. rośnie ku dołowi. Napór na przewód od wewnątrz ma zupełnie odmienny rozkład, tj. maleje ku dołowi. Tłumaczy się to koncentracją naprężeń u wierzchołka przewodu, rozluźnieniem zaś materiału przy otworze wysypowym. W przewodach mniejszej średnicy (model I i II) zarejestrowano napory o wartościach od 0,22 do 0,75 kPa w części górnej. W przewodzie IV (średnica 2-krotnie większa) wartości te wyniosły odpowiednio 0,29 i 0,84 kPa.

Przewody odciążające stanowiły połówki rur z tworzywa lub pleksiglasu. Model IV wyposażono w czujniki naporu i tensometry. Podczas napełniania i opróżniania mierzono odkształcenia tensometrów. Zaobserwowano wpływ wielkości otworu perforacyjnego rury na wielkość siły pionowej R przy podstawie rury jednoramiennej rys 5.85.



Rys. 5.85 Idea pomiaru siły w podstawie rury

Podczas opróżniania z użyciem otworu optymalnego zaobserwowano ciągły wzrost obciążenia rury, zarówno podczas napelniania, jak i opróżniania (rys. 5.86a). Podobny przebieg ma obciążenia podczas opróżniania z rurą bez perforacji (rys. 5.86c). Odmiennym przebiegiem w czasie charakteryzuje się obciążenie rury z otworem maksymalnym – o powierzchni równej 90 % powierzchni rury (rys. 5.86b).



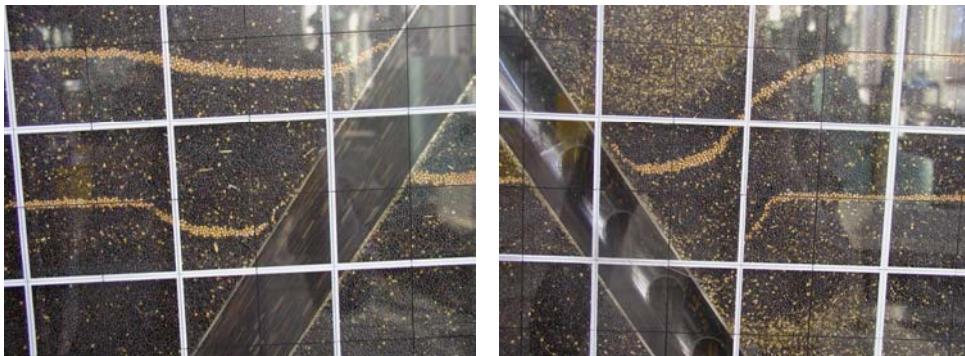
Rys. 5.86 Zarejestrowane wartości siły pionowej w podstawie modelu IV

Wartość obciążenia w tym przypadku jest najmniejsza ze wszystkich obserwowanych. Przepływ w przypadkach *a* i *c* był zwarty i powolny, natomiast w przypadku *b* zaobserwowano wyraźne rozluźnienie materiału w pobliżu otworu perforacyjnego i wysypowego. Tym też tłumaczy się uzyskane mniejsze wartości obciążeń.

5.9.4 Wydatek opróżniania

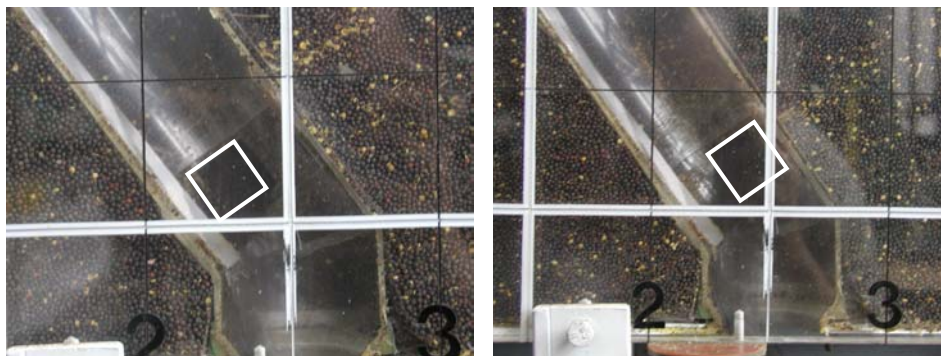
W ramach badań sprawdzono, jaki wpływ na wydatek opróżniania ma wielkość i kształt otworu w rurze odciążającej. Przebadano cztery podstawowe typy otworów bocznych w rurze o średnicy wewnętrznej 54 mm. Mierzono wydatek podczas opróżniania. Wyniki zestawiono w tablicy 5.8. Rozrózono dwa rodzaje wydatku. Pierwszy, towarzyszący opróżnianiu w pierwszej fazie, kiedy rura jest wypełniona a materiał spływa z partii komory ponad urządzeniem odciążającym. W drugiej fazie rury są puste, a materiał spływa z warstw znajdujących w dolnej części komory.

W ostatniej kolumnie zaznaczono, czy opróżnianiu w pierwszej fazie towarzyszy „podciąganie” materiału z dolnych stref, czy też nie. Ze zjawiskiem tym mamy do czynienia, kiedy występują zauważalne ruchy materiału w dolnych partiach, w pobliżu otworu. Dzięki zastosowaniu przewarstwień z gorczycy (rys. 5.87) dobrze zauważalne są ewentualne ruchy materiału w kierunku ku dołowi.



Rys. 5.87 Osiedlenie przewarstwień z gorczycy w pobliżu perforacji

Zmieniając położenie otworów o różnych kształtach w kierunku prostopadłym do osi symetrii przewodu (rys. 5.88 i 5.89), sprawdzano jego wpływ na wartość wydatku.



Rys. 5.88 Otwory kwadratowe w rurze – zmienne położenie



Rys. 5.89 Otwory okrągłe w rurze – zmienne położenie

Tablica 5.8. Wpływ kształtu, położenia i wielkości otworów perforacyjnych na wartość wydatku

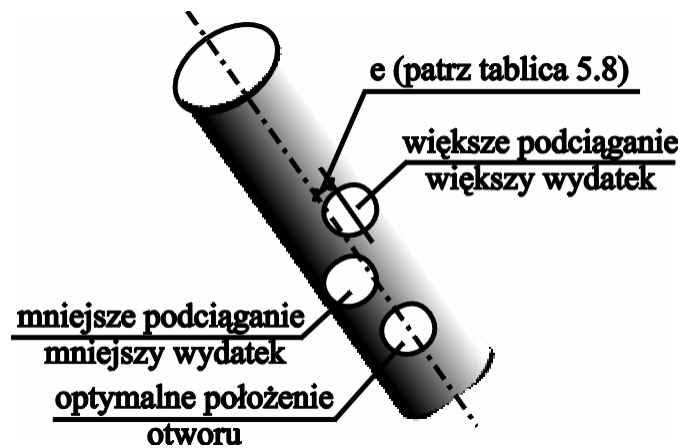
Lp.	Kształt i usytuowanie otworu	Wymiary [mm]				Pole powierzchni otworu [mm ²]	Wydatek		Czy widoczne podciąganie
		a	b	d	e		z przewodu [kg/s]	z otworu [kg/s]	
1		20	-	-	0	400	0,146	0,179	nie
		22	-	-	+8	484	0,156	0,036	tak
					0		0,150	0,024	nie
		-11	0,148	0,019	nie				
25	-	-	0	625	0,168	0,040	nie		
2		-	-	25	+8	490	0,149	0,039	tak
					0		0,147	0,031	nie
					-8		0,146	0,020	nie
				28	+8	615	0,152	0,053	tak
					0		0,149	0,074	nie
					-8		0,150	0,025	nie
3		30	16	-	+8	480	0,148	0,032	tak
					0		0,151	0,023	nie
					-9		0,154	0,015	nie
4		16	30	-	+8	480	0,154	0,029	tak
					0		0,151	0,021	tak
					-15		0,147	0,010	nie

Objaśnienia: t.a. – oś symetrii przewodu, e – mimośród usytuowania otworu (dodatni w kierunku ku górze – patrz rysunek 5.90), pole powierzchni otworu wysypowego 1145mm²

Optimalny wydatek uzyskano dla otworu okrągłego o średnicy 28 mm. Wydatek z silosu wynosi 0,149 kg/s a wydatek do rury w drugiej fazie opróżniania wyniósł 0,074 kg/s. W przypadku tym nie występuje „podciąganie”, a wydatek w drugiej fazie był największy w

porównaniu z otworem kwadratowym i prostokątnym. Jak wynika z badań, średnica 28 mm jest jednocześnie średnicą krytyczną dla przewodu średnicy wewnętrznej 54 mm. Minimalne zwiększenie otworu ponad 28mm skutkuje ruchami ziaren w sąsiedztwie otworu.

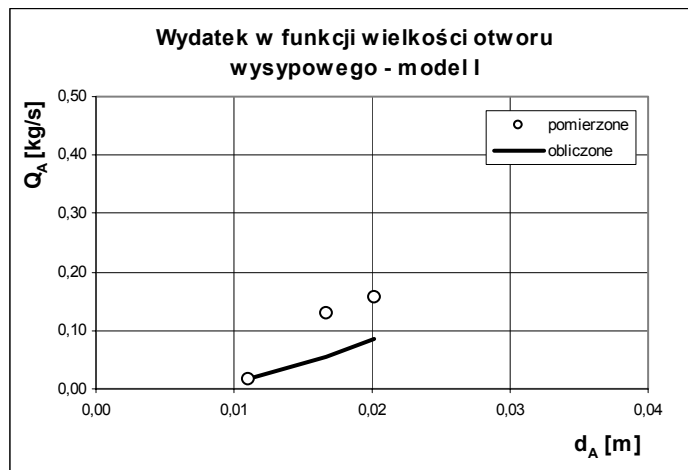
Położenie otworu na pobocznicy nachylonej rury, ma wymierny wpływ na wartość wydatku. Jego usytuowanie powyżej osi symetrii rury powoduje zwiększenie wydatku ale jednocześnie wywołuje ruch w dolnych partiach materiału (rys. 5.90). Przesunięcie otworu poniżej tej osi eliminuje w niektórych przypadkach „podciąganie” ale redukuje też znacząco wydatek.



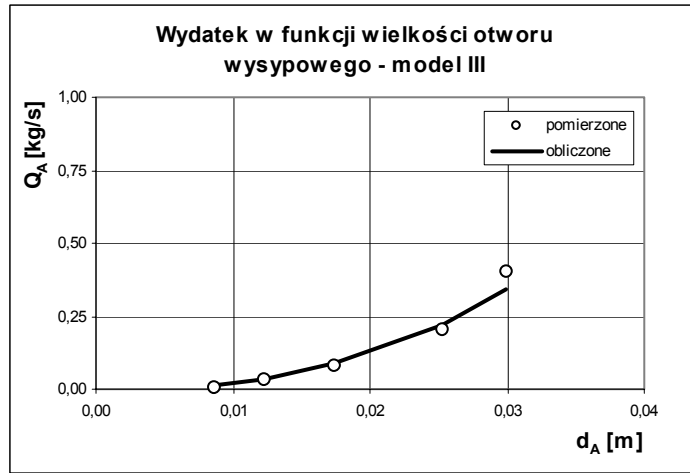
Rys. 5.90 Optymalne położenie perforacji w rurze okrągłej

Z badań wynika, że optymalnym położeniem otworu bocznego jest usytuowanie go w osi rury.

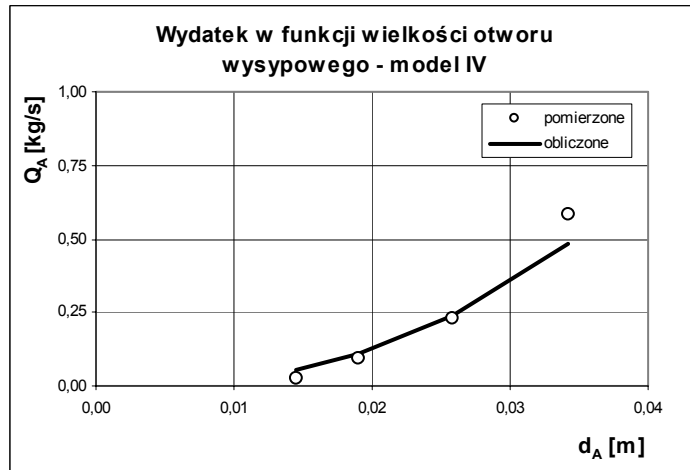
Przebadano również pozostałe przewody pod kątem określenia optymalnej średnicy otworu okrągłego. Wyniki pomierzonych wydatków i obliczonych z zależności Beverloo (wzór 3.32) przedstawiono na poniższych rysunkach.



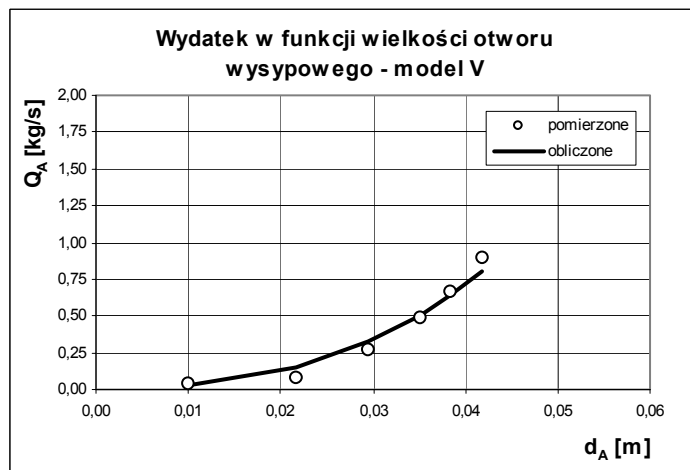
Rys. 5.91 Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wysypowego – model I



Rys. 5.92 Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wyspowego – model III



Rys. 5.93 Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wyspowego – model IV



Rys. 5.94 Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wyspowego – model V

Zgodność wyników pomiarów z zależnością empiryczną jest zadowalająca. Jedynie dla największych otworów wysypowych występuje rozbieżność wyników. Krzywą empiryczną przedstawioną na powyższych wykresach uzyskano przyjmując $C = 0,13$. Występuje tu rozbieżność z pracami innych autorów, którzy otrzymywali wyniki w zakresie $C = 0,60 \div 0,80$. Według autora pracy spowodowane jest to faktem nachylenia ramion przewodów względem pionu, a zatem mniejszą ich wydajnością.

Przeprowadzone badania pozwalają na uściślenie zależności empirycznej, bazującej na wzorze Beverloo (wz. 3.32), określającej wydatek materiału sypkiego wpływającego z nachylonej rury. W oparciu o wyniki badań autor proponuje stosowanie poniższego wzoru:

$$W = C_A \rho_i \sqrt{g} (d_R - kd)^{5/2} \quad (5.38)$$

gdzie: C_A – bezwymiarowa stała empiryczna, $C_A = 0,13$,

ρ_i – gęstość objętościowa materiału sypkiego,

d_R – średnica hydrauliczna otworu wysypowego w rurze,

k – stała wyznaczana empirycznie zależna od kształtu cząstki, dla cząstek okrągłych

$$k = 1,5$$

d – średnica cząstki,

g – przyspieszenie ziemskie.

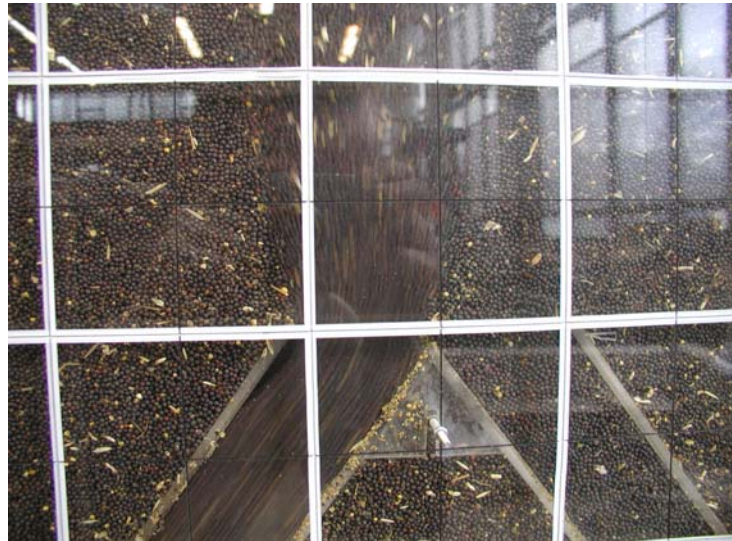
Należy zaznaczyć, że podana zależność została zweryfikowana dla rur o nachyleniu 55° , w zakresie średnic od 50 do 110 mm. Wpływ kąta nachylenia rury na wartość wydatku nie był ujęty w programie badań niniejszej pracy. W ramach dalszych badań należałoby przeprowadzić stosowne pomiary i analizy.

5.9.5 Inne wyniki

Poza pomiarami naporów, wydatków i ciągłą rejestracją przepływów za pomocą kamery, prowadzono również obserwacje przepływającego podczas opróżniania ziarna, utrwalając interesujące zjawiska w formie zdjęć.

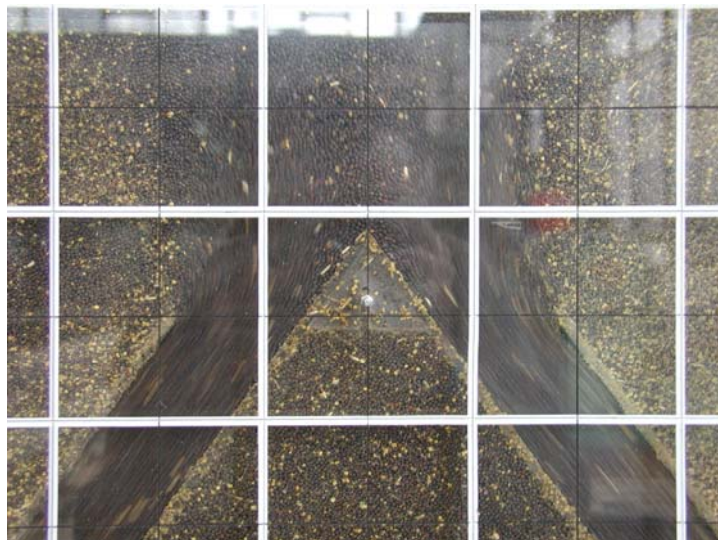
Przy opróżnianiu z użyciem dwuramiennego urządzenia odciążającego stwierdzono występowanie pustej strefy, pozbawionej materiału pod krawędzią przewodu. Przy krawędzi tej tworzy się swoisty rodzaj cienia, a rozpędzona masa materiału wpadając do przewodu omija tę strefę (rys. 5.95). Zwiększenie wydatku opróżniania powoduje wydłużenie opisywanej strefy. Kanał przepływu w widocznym na rysunku 5.95 ma prawie pionowe ścianki

w początkowej fazie opróżniania, które w miarę postępu opróżniania stają się coraz bardziej nachylone (rys. 5.97 i 5.98).

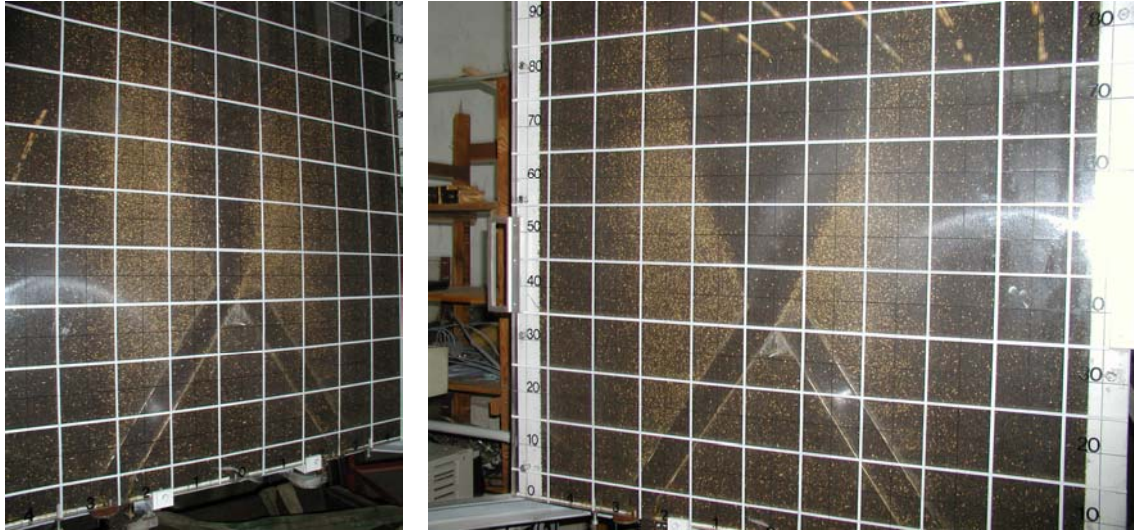


Rys. 5.95 Opróżnianie przez lewe ramię urządzenia Ia – widoczny niesymetryczny kanał przepływu

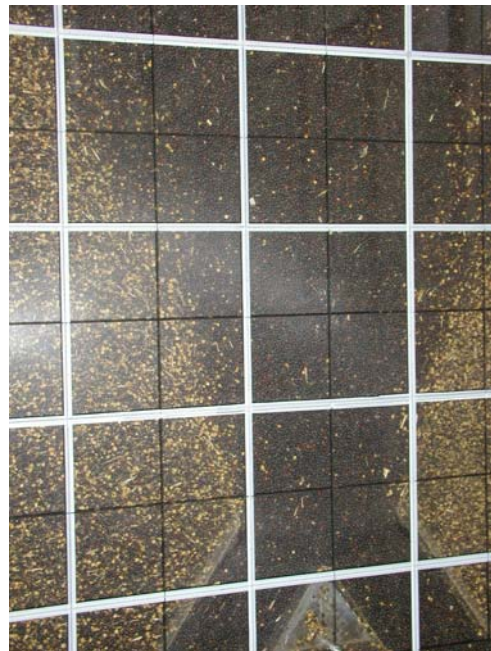
Ścięcie końców przewodu (typ Ib – tablica 5.4) zaowocowało zredukowaniem tego niekorzystnego zjawiska. Opróżnianie z takim przewodem przedstawiono na rysunku 5.96. Przy otwartych dwóch otworach wysypowych widoczne jest zaleganie materiału w środku, w pobliżu styku ramion przewodów. Strefa materiału pozostającego w bezruchu sięga do wnętrza rur. Bardziej niekorzystnym zjawiskiem, z punktu widzenia poprawności działania przewodów jest wytworzenie się pustki powietrznej, niewypełnienie całego przekroju rury, co ma miejsce również przy ekstremalnie dużych wydatkach.



Rys. 5.96 Opróżnianie przez dwa otwory wysypowe – widoczna martwa strefa na granicy otworów

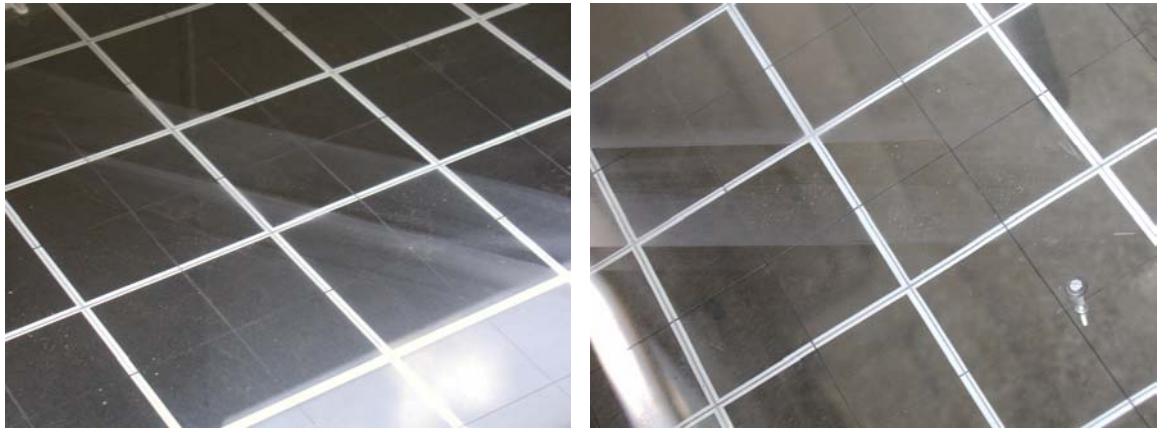


Rys. 5.97 Obraz przepływu w komorze opróżnianej przez lewy otwór – widoczny zasięg kanału przepływu rozszerzający się w miarę postępu opróżniania

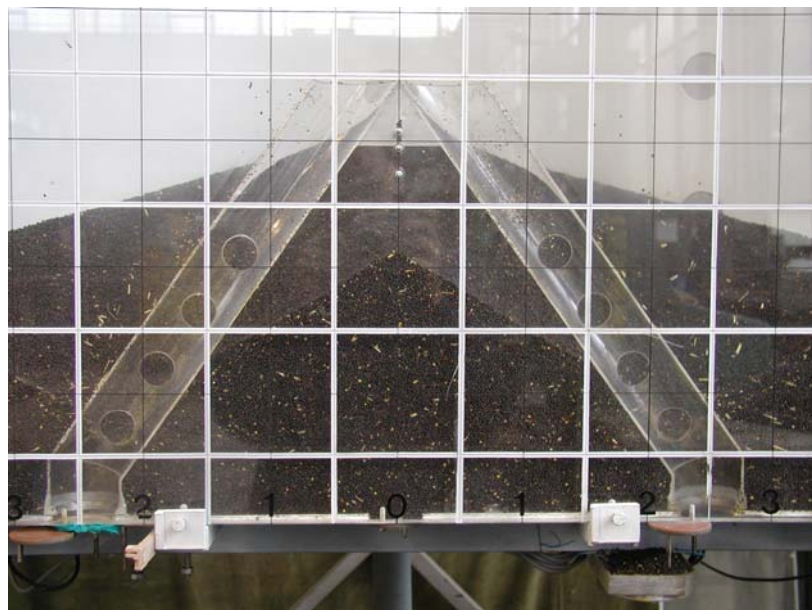


Rys. 5.98 Fragment komory z widocznym wierzchołkiem przewodu odciążającego, opróżnianej dwoma otworami jednocześnie

Widoczne przy odpowiednim oświetleniu ślady na przedniej ścianie modelu przedstawiono na rysunku 5.99. Widoczne są charakterystyczne strefy intensywnego zmatowienia materiału ściany w dolnych strefach kanału przepływu, gdzie jego natężenie było największe. Brak zmatowienia pod ramieniem przewodu świadczy o braku ruchu ziarna w tym miejscu. Materiał jest „schowany” pod przewodem, nie bierze udziału w przenoszeniu obciążeń i nie porusza się tak intensywnie lub pozostaje w spoczynku.

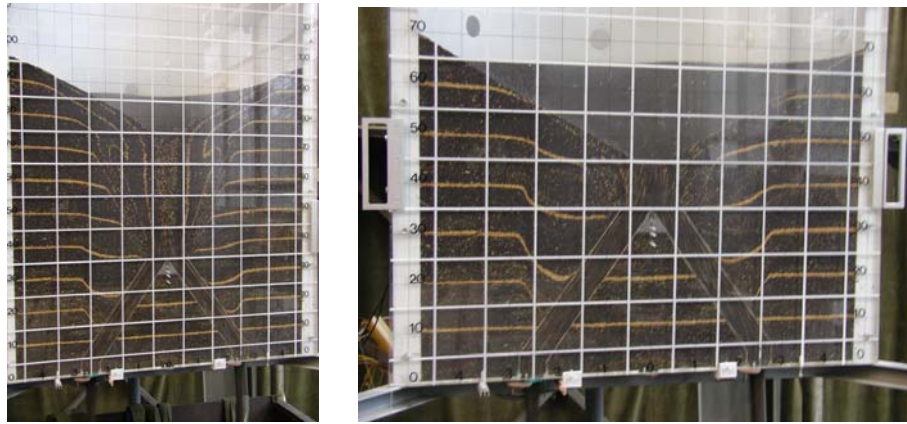


Rys. 5.99 Widok przedniej szyby po serii pomiarów – widoczne strefy o zróżnicowanym stopniu zmatowienia przez przemieszczające się ziarno



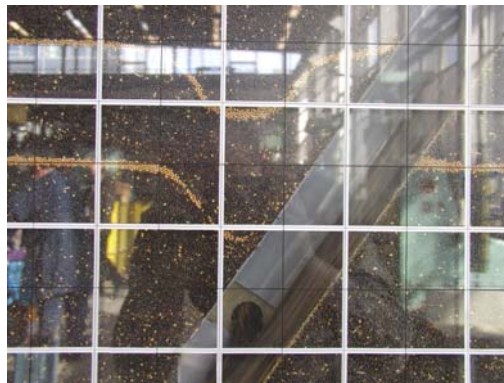
Rys. 5.100 Widok opróżnionej komory wyposażonej w przewód typu IIf – widoczne strefy martwe, których objętość wynosi 6% objętości komory

Większa część złoża pod przewodami stanowi strefy martwe i układa się w kształt stożka. Na rysunku 5.100 widoczne są strefy martwe pozostałe po opróżnieniu komory z użyciem przewodu IIf. Wybrane ujęcia z procesu opróżniania tym przewodem przedstawiono na rysunku 5.101. Średnice otworów perforacyjnych były nieco większe od optymalnych ($\phi 25$ zamiast $\phi 22$). Skutkowało to podciąganiem materiału w dolnych strefach komory, co dobrze jest widoczne na tym rysunku. Wystąpienie niewielkiego nawet podciągania pociąga za sobą poszerzenie kanału przepływu.



Rys. 5.101 Fazy przepływu w komorze wyposażonej w przewód typu II_f – widoczne osiadania warstw nad otworami

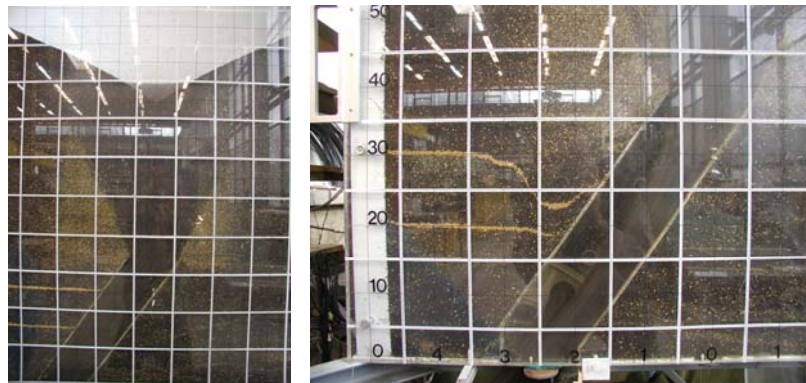
Jednym z bardziej interesujących zjawisk obserwowanych podczas badań było przejście z przepływu powolnego do burzliwego. Zilustrowano to na rysunkach 5.102 i 5.103. Wydatek przepływu burzliwego jest znacznie większy niż maksymalny wydatek osiągany w przepływie powolnym, odbywa się on jednak tylko wąskim kanałem w dolnej części przewodu. Następnym tego jest odkrycie otworu perforacyjnego, intensywne podciąganie, a co za tym idzie zwiększenie wydatku.



Rys. 5.102 Komora z przewodem III_c – całkowite otwarcie otworu wysypowego powoduje przejście przepływu w burzliwy

Podobnie jak w przypadku przewodu III_c (rys. 5.103), również w przewodzie IV i V wystąpił przepływ burzliwy. Nie stwierdzono jednak występowania opisanego zjawiska w komorze z przewodem I i II. Określono krytyczne wielkości otworów wysypowych, przy których przekroczeniu przepływ staje się burzliwy. Na rysunku 5.103 przedstawiono moment przejścia z jednego typu przepływu w drugi, zaobserwowanych w modelu V_c, o największej średnicy z przebadanych wynoszącej 110 mm. Struga płynącego materiału wypełnia tylko w połowie przekrój rury, odsłaniając otwór na pobocznicę. Warstwy kontrastowe w materiale

sypkim, w dolnych strefach komory modelu silosu, osiadają w szybkim tempie, co świadczy o intensywnym podciąganiu.



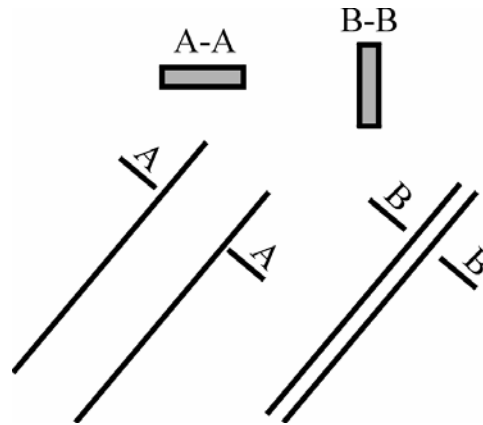
Rys. 5.103 Kanał przepływu w modelu Vc – brak osiadań w przewarstwieniach gorczyca dowodzi prawidłowo przyjętej średnicy perforacji (rys. lewy); całkowite otwarcie otworu wysypowego powoduje przejście w przepływ burzliwy (rys. prawy)

Poniżej (tab. 5.9) zestawiono krytyczne powierzchnie otworów wysypowych, przy których występuje przejście z przepływu powolnego do burzliwego.

Tablica 5.9 Krytyczne powierzchnie otworów wysypowych

Symbol modelu / średnica wewn. rury [mm]	Krytyczna powierzchnia otworu A_{otw}	Pole przekroju rury A_r	Wymiar miarodajny „b”	Iloraz A_{otw}/A_r
-	[mm ²]	[mm ²]	[mm]	[-]
IIIc / 66	1513	3421	30	0,442
IVc / 92	2056	6648	32	0,309
Vc / 110	2297	9503	32	0,242

Z zestawienia wynika, że iloraz krytycznej powierzchni otworu do pola przekroju średnicy, przy którym następuje przejście z przepływu powolnego do burzliwego maleje ze wzrostem średnicy. Biorąc zaś pod uwagę półkolisty kształt otworu wysypowego, bardziej miarodajny wydaje się wymiar b otworu prostopadły do przedniej płaskiej ściany. Dla trzech średnic rur (model III, IV i V) wymiar b wynosi ok. 32 mm. Może to dowodzić, że w układzie nachylonego przewodu, przez który przepływa materiał sypki, istnieje graniczna wartość szerokości szczeliny wysypowej, mierzona w kierunku prostopadłym do płaszczyzny nachylenia przewodu, po przekroczeniu której przepływ przechodzi w burzliwy. Ponadto powyższe wyniki wskazują, że przepływ burzliwy szybciej wystąpi w płaskim nachylonym kanale o dłuższym boku leżącym w przekroju poziomo, niż w identycznym kanale, z przekrojem obróconym o 90°. Zobrazowano to na rysunku 5.104.



Rys. 5.104 Zobrazowanie hipotezy wpływu ustawienia przewodu prostokątnego

Potwierdzenia powyższej hipotezy należałoby szukać w badaniach przewodów o przekroju prostokątnym, z prostokątnymi otworami wysypowymi, w konfiguracjach jak opisano powyżej.

5.9.6 Wnioski

Przeprowadzone badania modelowe miały na celu jakościową i ilościową ocenę zjawisk występujących w komorze z przewodami odciażającymi o nachylonych rurach. Konstrukcja modelu z przezroczystą przednią ścianą zapewniała obserwację charakterystycznych cech przepływu, zaburzała jednak wysyp materiału z komory. W obiekcie naturalnym przewody centrują przepływ, kierując go ku środkowi komory, w modelu zaś występuje przepływ w kierunku przedniej, płaskiej ściany.

Otrzymane rezultaty świadczą jednak o pozytywnym wpływie obecności przewodów na rozkład i wartości naporów w dolnych partiach komory silosu. Z analizy obrazów przepływu wynika, że źle zaprojektowane przewody, posiadające np. zbyt duże lub źle usytuowane otwory perforacyjne, powodują wprowadzenie w ruch prawie całej masy znajdującej się w komorze, co jest sprzeczne z ideą ich działania.

Dokładna analiza wielkości, kształtu i położenia otworów perforacyjnych pozwala stwierdzić, że najbardziej optymalny jest otwór umieszczony w osi przewodu o średnicy równej połowie średnicy rury. Stosowanie większych średnic skutkuje podciąganiem materiału ze stref nieruchomych, a mniejsze średnice nie zapewniają odpowiedniego wydatku w drugiej fazie opróżniania.

Istnieje pewna krytyczna wielkość otworu wysypowego, po przekroczeniu której przepływ w przewodzie przechodzi w burzliwy, odkrywając otwory perforacyjne, czego skutkiem jest intensywne podciąganie materiału z dolnych stref komory.

6. Weryfikacja badań modelowych na obiekcie w skali naturalnej

6.1 Opis obiektu

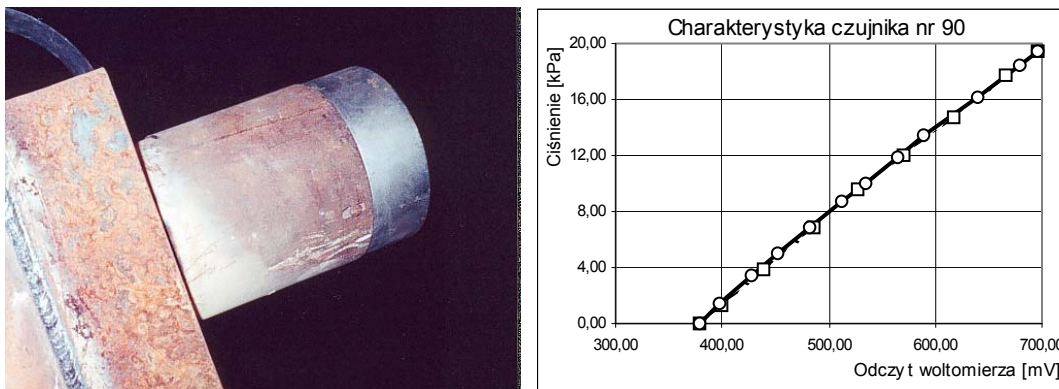
W celu zweryfikowania wyników badań modelowych przeprowadzono w kwietniu i maju 2001 r. badania na obiekcie w skali naturalnej. Komora silosowa na rzepak średnicy 19 m znajdująca się w jednym z zakładów tłuszczowych w Polsce została wyposażona w rurowe urządzenie odciążające. Opis komory tego typu znajduje się w rozdziale 2 „Cel i zakres pracy”. Ze względów montażowych urządzenie zostało podzielone na części i włożone przez otwór technologiczny, a następnie połączone w całość za pomocą spawania.

W celu zachowania przepływu centrycznego zalecono użytkownikowi elewatora opróżnianie według ustalonej kolejności. W pierwszej fazie opróżniania była górna część materiału znajdująca się powyżej poziomu rur. W następnej kolejności wysypują się przez otwory umieszczone w rurach warstwy materiału z dolnej części komory. Pozostałe strefy martwe (ok. 300 t.) opróżniane są przy użyciu łopaty mechanicznej.

6.2 Opis przeprowadzonych badań

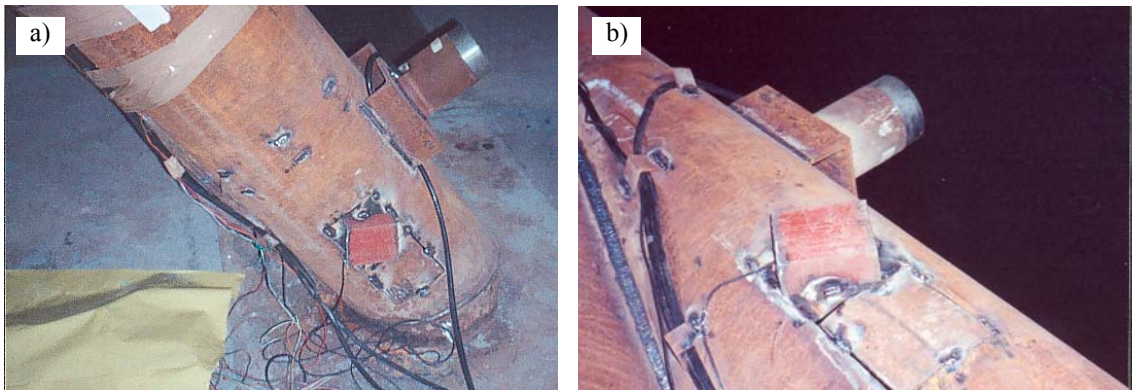
Badania miały na celu weryfikację pomiarów przeprowadzonych na modelu. W badaniach wykorzystano oprócz czujników tensometrycznych, opisanych w rozdziale 5 „Badania modelowe”, czujniki magnetosprężyste.

Sztywniejsza membrana tego typu czujnika pozwala na stosowanie go w większych zakresach naporu. Widok i wykres skalowania czujnika w zakresie 20k Pa przedstawiono na rysunku 6.1.



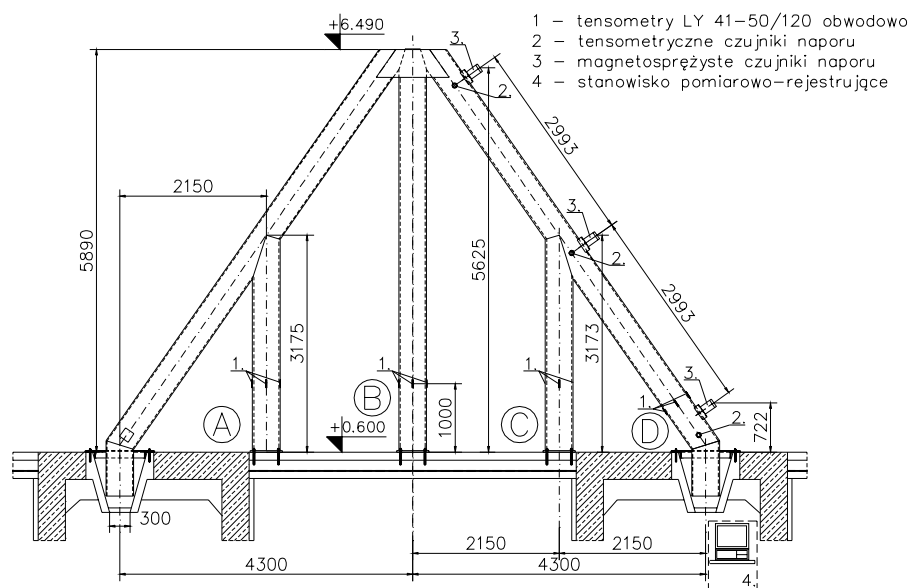
Rys.6.1. Widok i charakterystyka czujnika magnetosprężystego Nr 90

Urządzenie odciążające wyposażono zatem w trzy magnetościężyste czujniki naporu normalnego znajdujące się na górnej powierzchni ukośnych rur w trzech poziomach. Czujniki te mierzyły składową naporu prostopadłą do osi nachylonej rury. Ponadto w środku ukośnego odcinka przewodu umieszczono trzy tensometryczne czujniki naporu normalnego, mierzące składową poziomą naporu w rurze. Czujniki te osadzone były w płaskim gnieździe, które zapewniło licowanie membrany czujnika. Na rysunku 6.2 przedstawiono fragment ukośnego odcinka rury wraz z czujnikami naporu w poziomie nad posadzką (a) i przy połączeniu z kolumną C (b).



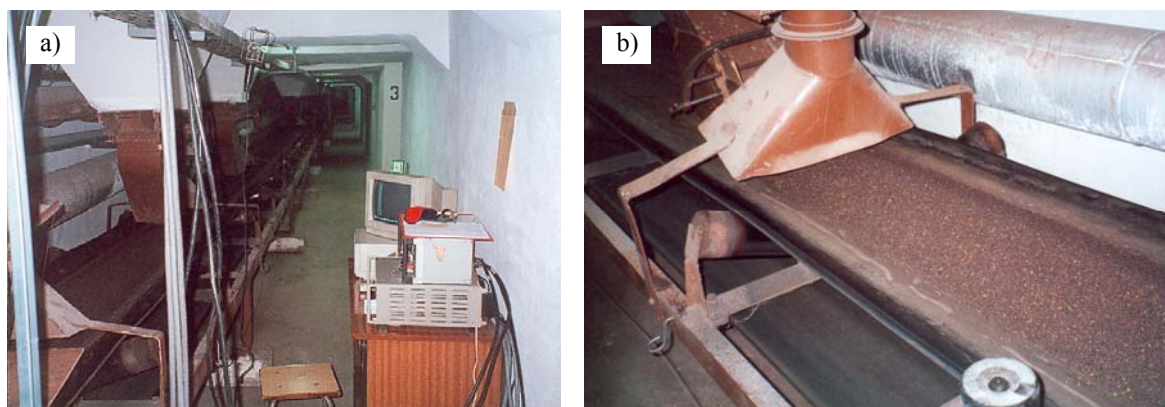
Rys. 6.2. Widok ukośnego odcinka przewodu odciążającego wyposażonego w czujniki naporu

Dodatkowo, na trzy pionowe rury stanowiące podpory i na ukośny odcinek w dolnej strefie naklejono foliowe tensometry elektrooporowe typu HBM LY41-50/120 w celu pomiaru odkształceń podpór. Tensometry umieszczone były na wysokości 1 m licząc od poziomu posadzki. Rozmieszczenie tensometrów i czujników naporu zamieszczono na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Widok urządzenia odciążającego wyposażonego w przyrządy pomiarowe

Sygnaly elektryczne z czujnikow parcia mierzone byly przy uzyciu woltomierza a nastepnie przy uzyciu wykresu kalibracji zamieniane na wartosci naporu. Sygnaly z mostkow tensometrycznych przetwarzane byly na dane w postaci cyfrowej i rejestrowane przez komputer. Stanowisko pomiarowo-rejestrujace umieszczone bylo w tunelu podkomorowym, w ktorym umieszczone sa przenośniki taśmowe do jej opróżniania (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Stanowisko pomiarowo-rejestrujace w tunelu podkomorowym (a) i przenośnik taśmowy z wietrznikiem urządzenia aspirujacego (b)

Przenośniki taśmowe miały przyporządkowane numery i tak taśma po stronie urządzeń rejestrujących (prawa strona na rys. 6.3) miała symbol T2, przeciwna zaś do niej (strona lewa) symbol T3. Dodatkowo, w czasie opróżniania obserwowano wizualnie przez otwory zasypowe górny poziom ziarna, mierząc poziom zasypu, dokonywano pomiaru wydatku przy uzyciu wagi samoczynnej z koszem wywracającym i obserwacji towarzyszących zjawisk (drgań, pulsacji, itp.). Odnotowywano też przestoje nocne, dzienne oraz zmiany otworów wysypowych.

Pomiary wykonano dla jednego pełnego cyklu napelniania i opróżniania, realizowanego w systemie dwuzmianowym od ok. godz. 7 do 21. Z tego powodu wyniki pomiarów należy traktować jako jakościową ocenę zjawiska. Zasypywanie komory trwało od 26.IV do 10.V, opróżnianie rozpoczęto 14.V, a zakończono 26.V. Po 5 dniach opróżniania, tj. 18.05 dosypano ok. 700 ton rzepaku. Ze względu na potrzeby technologiczne zakładu zmieniano w czasie opróżniania otwór wysypowy, bądź wykorzystywano oba otwory równocześnie. W czasie badań wykonano też trzykrotnie pomiar temperatury rzepaku w komorze za pomocą sond i oprzyrządowania będących na wyposażeniu elewatora.

W wyniku badań otrzymano wykresy naporu normalnego w czasie, działającego na czujniki umieszczone za zewnątrz rury, a także rozkład i wartości naporów działających wewnątrz

przewodu, mierzone podczas napełniania i opróżniania. W tabelicy 6.1 zestawiono zaś poszczególne operacje wykonywane w czasie opróżniania, dotyczące włączania bądź wyłączenia taśm, przestojów, itp.

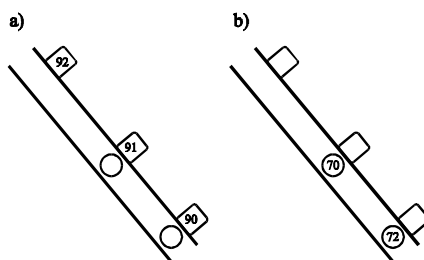
Tablica 6.1 Zestawienie operacji dokonywanych podczas opróżniania

numer odczytu	czas odczytu [godz.]	opis zdarzenia	numer odczytu	czas odczytu [godz.]	opis zdarzenia
5	0,00	rozpoczęcie pomiarów - komora pełna	1793	139,42	T2
6	0,00	włączenie taśmy T2	1794	142,42	T2
366	3,72	zatrzymanie taśmy T2	1795	146,42	T2
378	3,75	początek przestoju nocnego	1796	158,42	T2
379	15,80	koniec przestoju nocnego	1797	163,42	T2
423	15,83	włączenie taśmy T2	1798	166,42	T2
632	18,32	zatrzymanie taśmy	1799	170,42	T2
640	18,68	włączenie taśmy T3	1800	182,42	T2
732	18,83	zatrzymanie taśmy T3	1801	187,42	T2
780	18,91	włączenie taśmy T2	1802	190,42	T2
975	21,13	zatrzymanie taśmy T2	1803	194,42	T2
976	21,13	włączenie taśmy T3	1804	206,42	T2
1199	24,22	zatrzymanie taśmy T3	1805	211,42	T2
1200	24,22	włączenie taśmy T3	1806	214,42	T2
1314	27,58	zatrzymanie taśmy T3	1807	218,42	T2,T3
1315	27,62	początek przestoju nocnego	1808	230,42	T2,T3
1316	40,42	koniec przestoju nocnego	1809	235,42	T2,T3
1317	40,42	włączenie taśmy T3	1810	238,42	T2
1352	42,00	zatrzymanie taśmy T3	1811	242,42	T2
1354	44,42	włączenie taśmy T2	1812	254,42	T2,T3
1505	45,47	zatrzymanie taśmy T2	1813	259,42	T2
1507	45,50	włączenie taśmy T3	1814	262,42	T2
1581	45,53	włączenie taśmy T2- obie taśmy razem	1815	266,42	T2
1789	51,45	zatrzymanie obu taśm	1816	278,42	T2
1790	86,42	dosypano 700 ton ziarna	1817	280,42	T2
1791	115,42	T2	1818	280,92	T2
1792	134,42	T2	1819	281,00	pusta komora

6.3 Wyniki badań

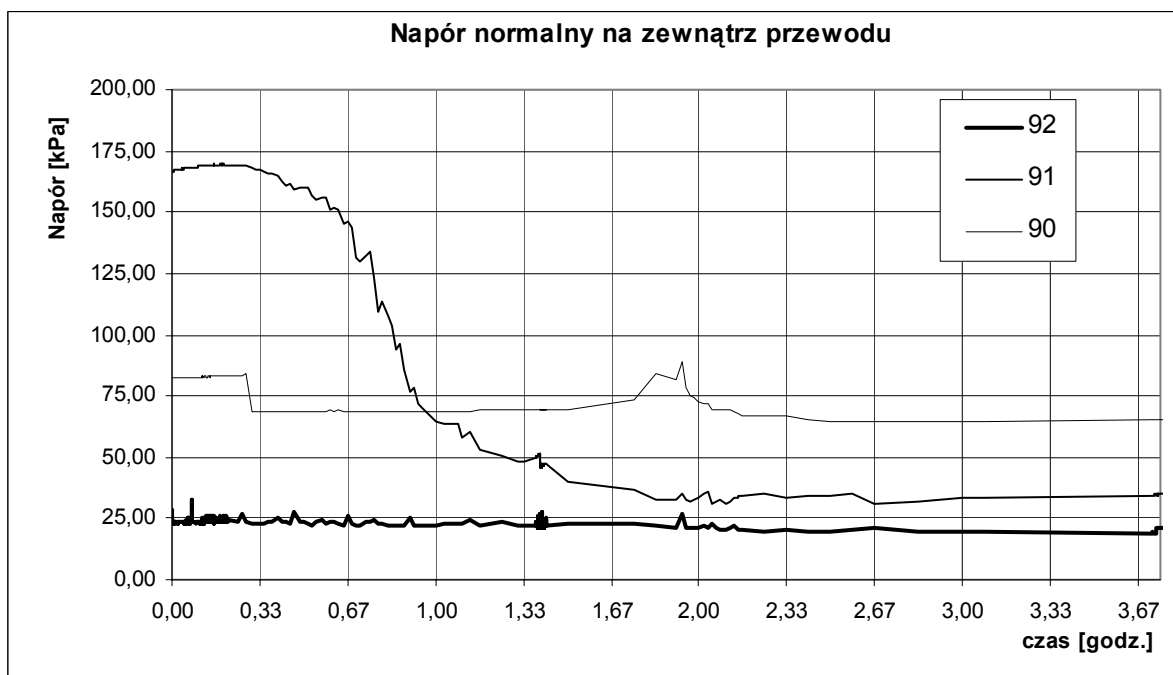
6.3.1 Obciążenia przewodów odciążających

Numerację czujników umieszczonych na zewnątrz rury zamieszczono na rysunku 6.5a, a numerację czujników tensometrycznych umieszczonych wewnątrz przewodu na rysunku 6.5b.



Rys. 6.5. Numeracja czujników do pomiaru naporu, zamontowanych na zewnątrz (a) i w przewodzie odciążającym (b)

Poniższy wykres (rys. 6.6) przedstawia odczyty naporu działającego na czujniki umieszczone na zewnątrz rury, wykonane w pierwszym dniu opróżniania po otwarciu otworu wysypowego (uruchomieniu taśmy T2).



Rys. 6.6. Wykresy naporu na czujniki umieszczone na zewnątrz rury w czasie początkowych 4 godzin opróżniania

Z analizy wynika, że w momencie otwarcia otworu wysypowego największą wartość wykazywał czujnik środkowy. Wartość ta, oscylująca w pobliżu 170 kPa zaczęła zmniejszać się po ok. 160 odczycie. Należy zaznaczyć, że odczyty w czasie 0-0,30 godz. były wykonywane w odstępach co 5 s., a odczyty 0,30-3,75 co ok. 1min. Wartości naporu rejestrowane przez czujnik najwyższy (92) oscylowały równomiernie wokół wartości 25 kPa z niewielkimi pikami, co może nasuwać wniosek o łagodnym przepływie materiału w pobliżu wierzchołka urządzenia odciążającego, a co za tym idzie o poprawności jego działania.

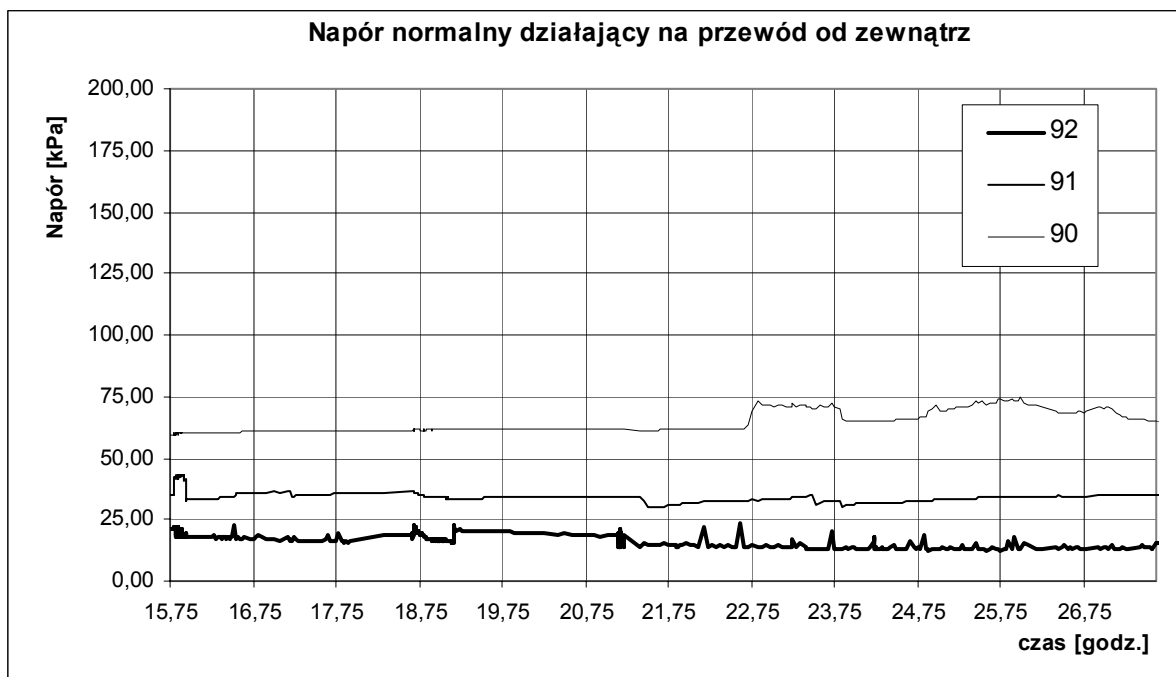
Porównanie wartości statycznych (po napełnieniu) z wartościami maksymalnymi w początkowej fazie opróżniania zestawiono w tabelicy 6.2.

Tablica 6.2 Porównanie wartości naporów po napełnieniu i maksymalnych w czasie opróżniania

odczyt	90	91	92
0,00	79,71	123,15	23,90
max	82,81	168,13	28,75
przyrost [%]	3,9	36,5	20,3

Z analizy wynika, że największy przyrost zarejestrowano na czujniku środkowym i wyniósł on 36,5 %, najmniejszy zaś przyrost zarejestrowano najniżej, na czujniku 90 (3,9 %).

Na poniższym wykresie (rys. 6.7) zamieszczono odczyty z kolejnego dnia opróżniania (15,75-27,62), wykonywane równomiernie w odstępach ok. 1 min. z lokalnymi zagęszczeniami odczytu.



Rys. 6.7. Wykresy naporu na czujniki umieszczone na zewnątrz rury w czasie drugiego dnia opróżniania

Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że w drugim dniu opróżniania napory miały charakter quasi statyczny bez dużych wahań.

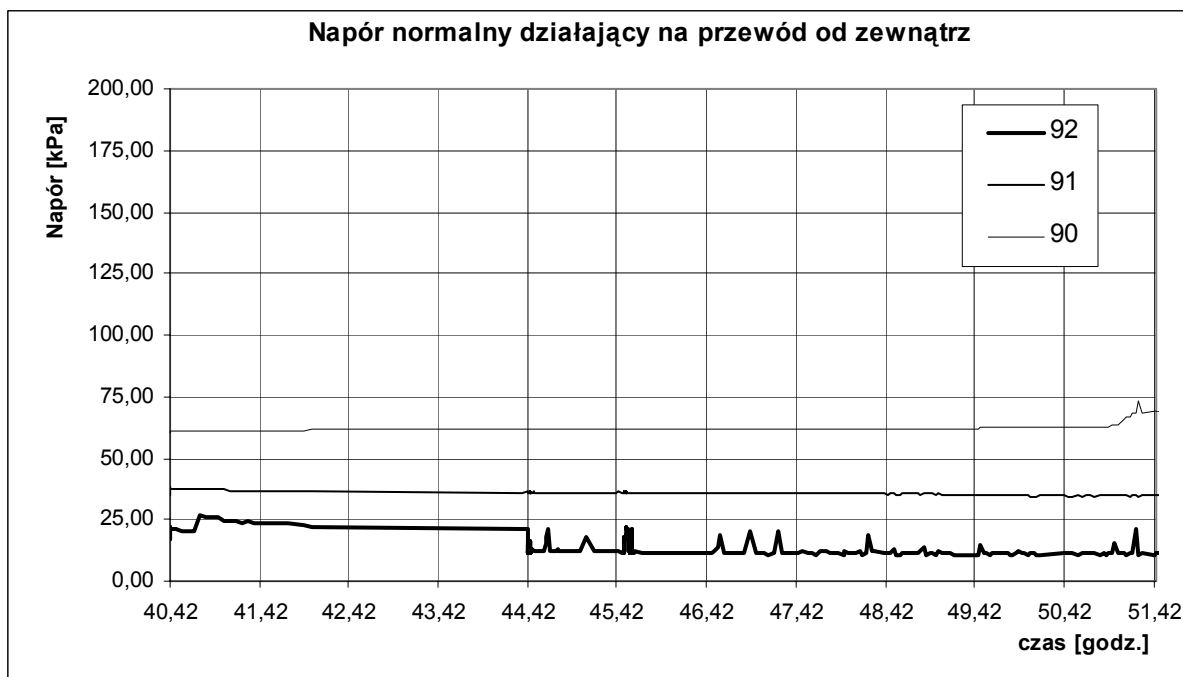
Pomiędzy odczytem 3,75 a 15,75 wystąpiła 11-godzinna przerwa nocna. Porównanie wartości tych odczytów pokazano w tabelicy 6.3.

Tablica 6.3 Porównanie odczytów 3,75 i 15,75, oddzielonych 11-godzinną przerwą nocną

odczyt	90	91	92
3,75	65,04	34,89	21,11
15,75	59,53	42,21	21,41
różnica [%]	-8,5	21,0	1,4

Z porównania wynika, że przez czas przerwy w opróżnianiu 21 % przyrost wartości naporu zarejestrowano na środkowym czujniku, zaś czujnik najniższy zarejestrował 8,5 % spadek naporu.

Odczyty naporów, dokonane w trzecim dniu opróżniania przedstawiono na rysunku 6.8.



Rys. 6.8. Wykresy naporu na czujniki umieszczone na zewnątrz rury w czasie trzeciego dnia opróżniania

W ciągu trzeciego dnia pomiarów wykresy czujników 90 i 91 przebiegały prawie liniowo, natomiast czujnik 92 rejestrował niewielkie piki naporu o wartościach większych od wartości podstawowej do 80 %.

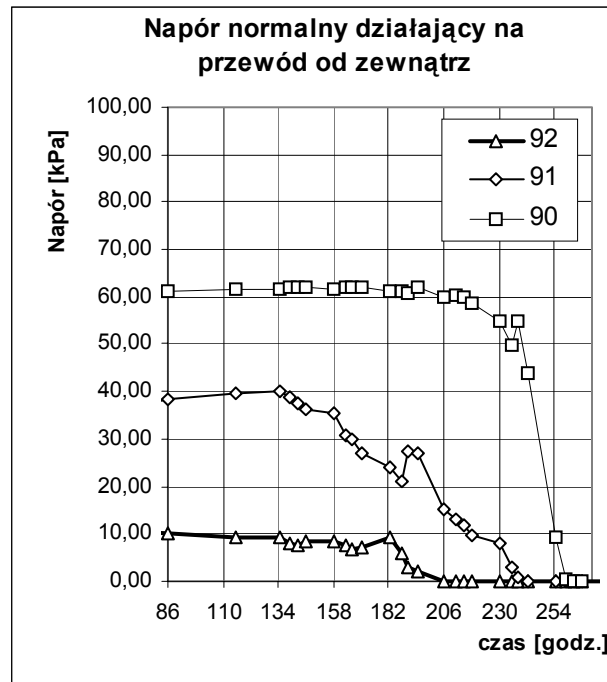
Analogicznie do poprzednich odczytów, między odczytem 27,62 a 40,42 wystąpiła 13-godzinna przerwa nocna. Porównanie wartości odczytów pokazano w tabelicy 6.4.

Tablica 6.4 Porównanie odczytów 27,62 i 40,42, oddzielonych 11-godzinną przerwą nocną

odczyt	90	91	92
27,62	64,96	34,89	15,39
40,42	60,15	38,06	16,71
różnica [%]	-7,4	9,1	8,6

Podobnie jak poprzednio (tab. 6.3), spadek naporu zanotowano na najniższym czujniku, a na pozostałych wzrost.

Zakładając wydatek z komory na poziomie 46 t/godz., w ciągu trzech dni pomiarów (do odczytu 51,42) wysypano z komory ok. 1100 ton ziarna, co stanowi ok. 17 % składowanego materiału. Po tym czasie pomiary były wykonywane 4-krotnie w ciągu dnia, aż do całkowitego opróżnienia komory. Poniżej (rys. 6.9) zamieszczono wykresy naporów w drugiej, dłuższej fazie opróżniania, trwającej 8 dni (4 odczyty dziennie). Po odczycie 82,42 dosypano ok. 700 ton ziarna.



Rys. 6.9. Wykresy naporu rejestrowane 4-krotnie w ciągu dnia

Dokonane pomiary naporów przy użyciu magnetosprężystych czujników naporu (na zewnątrz rur) pokazały, że przepływ wokół elementów pograżonych w ośrodku sypkim ma charakter dynamiczny i losowy. Nie udało się jednoznacznie określić rozkładu naporów działających na zewnątrz przewodów ze względu na fakt, iż same czujniki wprowadzały znaczne zaburzenia w przepływie, a spodziewane wartości składowych naporów obliczone według Janssena [16] i zależności z pracy [81]:

$$p_n = p_v[1 - (1 - K_s) \sin^2 \alpha + \mu_1 K_s \sin \alpha \cos \alpha], \quad (6.1)$$

gdzie: p_v – napór pionowy [kPa],

K_s – iloraz naporu poziomego do pionowego [-],

α – kąt nachylenia płaszczyzny czujnika [°],

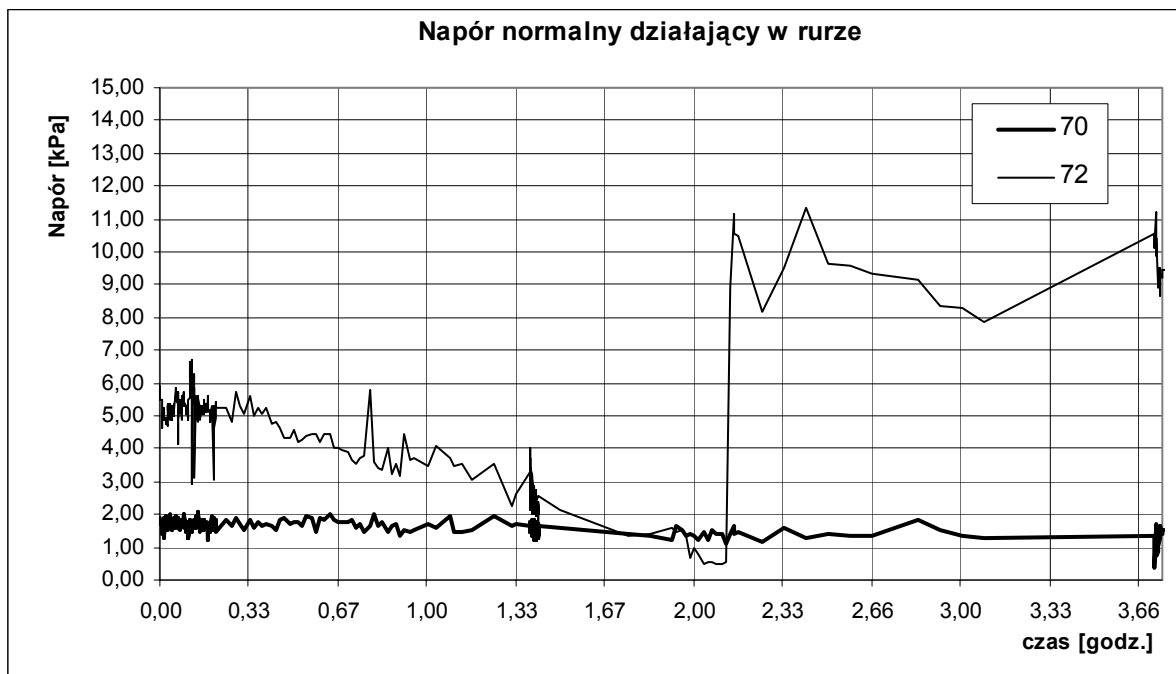
μ_1 – współczynnik tarcia materiału o czujnik [-],

odbiegają znacznie od wartości pomierzonych.

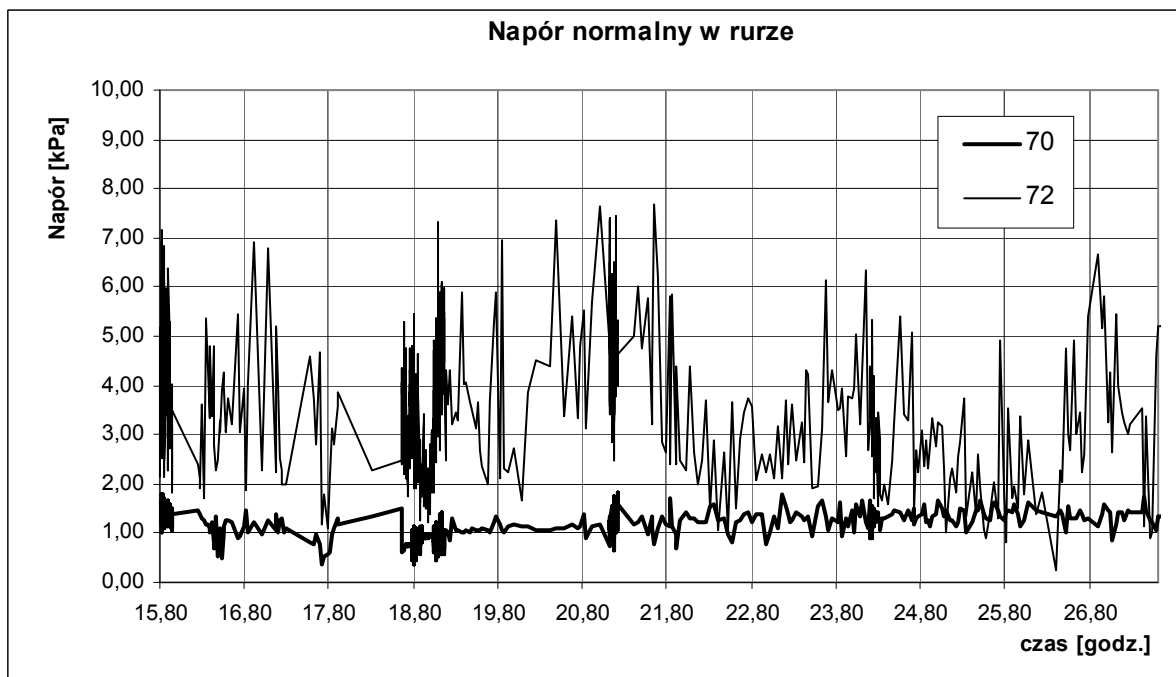
Tabela 6.5 Porównanie pomiarów naporu od zewnątrz z obliczeniami według Janssena i zależności (6.1)

numer czujnika	90	91	92
z/H	0,95	0,86	0,77
średni napór z 2-go dnia pomiarów	64,52	34,35	19,65
napór poziomy według Janssena	102,20	96,28	89,80
napór pionowy według Janssena	198,60	181,67	169,40
napór normalny z sumy składowych	197,63	183,07	170,72
napór normalny z zależności (6.1)	148,33	135,69	126,52
Do obliczeń przyjęto: $K_s = 0,53$; $\alpha = 55^\circ$; $\mu_1 = 0,25$			

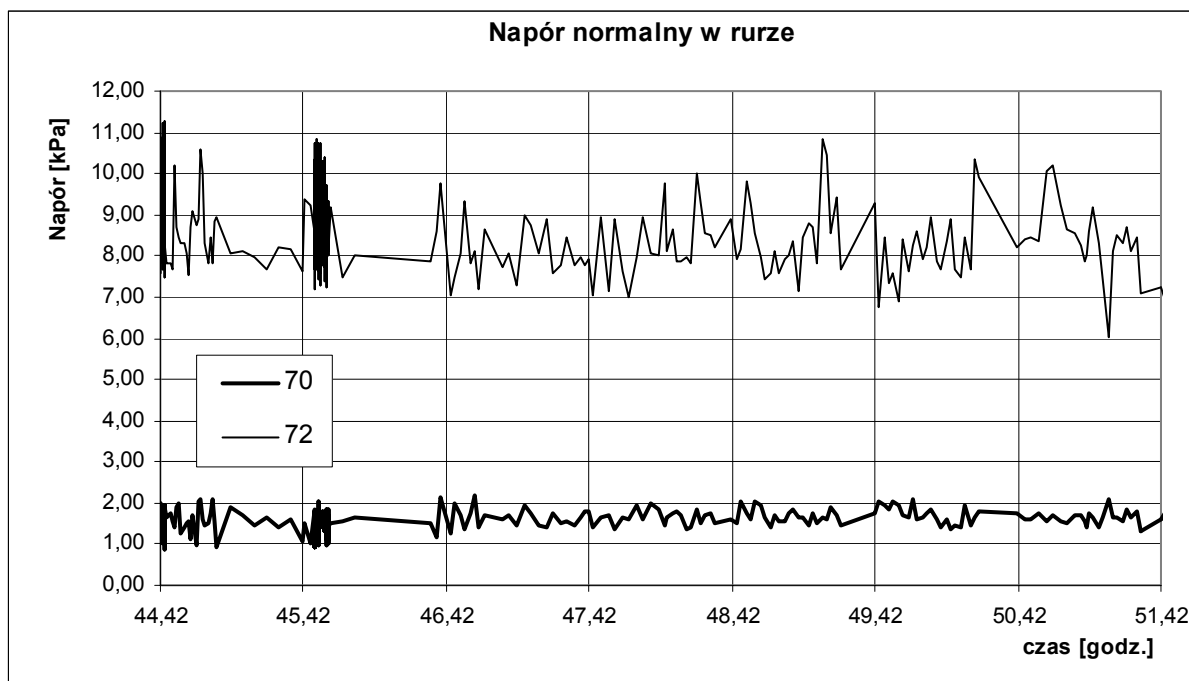
Równoległe z rejestrowaniem naporów działających na przewód mierzono za pomocą czujników umieszczonych w rurze napór normalny w przewodzie. Poniższe wykresy (rys. 6.10 – 6.12) przedstawiają napór w przewodzie w czasie opróżniania, sporządzone podobnie jak rysunki 6.6 – 6.8.



Rys. 6.10. Wykresy naporu na czujniki umieszczone wewnątrz rury w czasie początkowych 4 godzin opróżniania



Rys. 6.11. Wykresy naporu na czujniki umieszczone wewnątrz rury w czasie drugiego dnia opróżniania

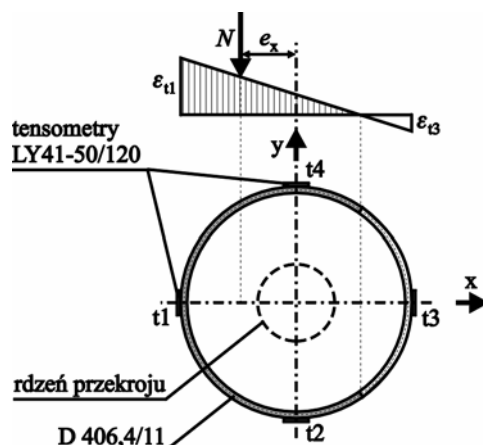


Rys. 6.12. Wykresy naporu na czujniki umieszczone wewnątrz rury w czasie trzeciego dnia opróżniania

Z analizy powyższych wykresów wynika, że składowa pozioma napór w rurze, którą przepływa materiał sypki jest zmienna na jej długości. W środku ukośnego odcinka przewodu (czujnik 70) napory oscylują w pobliżu wartości 1-2 kPa przez cały czas procesu opróżniania. Dowodzi to faktu, że przewód jest wypełniony przynajmniej powyżej czujnika, a stopień zagęszczenia materiału nie jest duży.

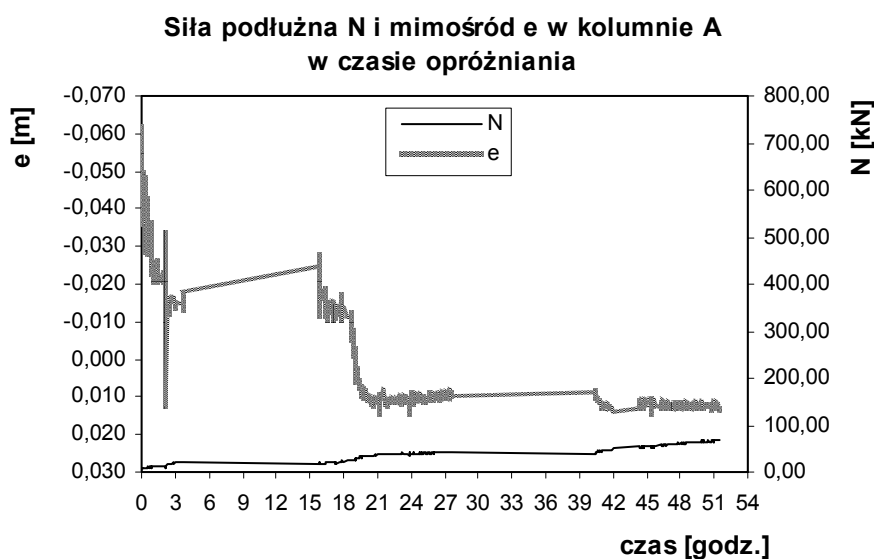
Czujnik najniższy zaś, umieszczony w pobliżu załamania ukośnego odcinka przewodu (rys. 6.2) wykazywał wartości naporów na poziomie 4-8 kPa z wyraźnymi pulsacjami. Dowodzi to dynamicznego charakteru przepływu w pobliżu końca rury nad otworem wysypowym. Na uwagę zasługuje początkowa faza opróżniania (rys. 6.10). Od czasu 0,00 do ok. 0,25 rejestrowano sygnały co 5s., a do czasu 0,165 co 1min. Do godz. 2,11 obserwowano spadek, a następnie gwałtowny wzrost naporu aż do poziomu ok. 9,0 kPa. W późniejszym okresie procesu opróżniania napór oscylował ze znaczną amplitudą w zakresie 2,5-5,5 kPa. Istnienie tak intensywnych w swym natężeniu pulsacji można wytłumaczyć tym, że właśnie w pobliżu załamania przewodu z nachylonego w pionowy, poruszający się z dużą prędkością strumień materiału zostaje nagle wyhamowany i zmienia kierunek ruchu na pionowy. Nagłe zatrzymanie strumienia materiału, znajdującego się w ruchu skutkuje zwiększeniem wartości naporu i dynamicznym oddziaływaniem na rurę, w której jest uwięziony bez możliwości przemieszczenia się na boki.

Przy pomocy tensometrów elektrooporowych naklejonych na rurach, tworzących konstrukcję urządzenia odciążającego mierzone przyrosty odkształceń. Tensometry zostały naklejone na gotową konstrukcję odciążającą. Mierzone zatem odkształcenia odpowiadają zmianom wynikającym z oddziaływania materiału sypkiego. Położenie tensometrów przedstawia rysunek 6.3, a układ tensometrów w przekroju rysunek 6.13.

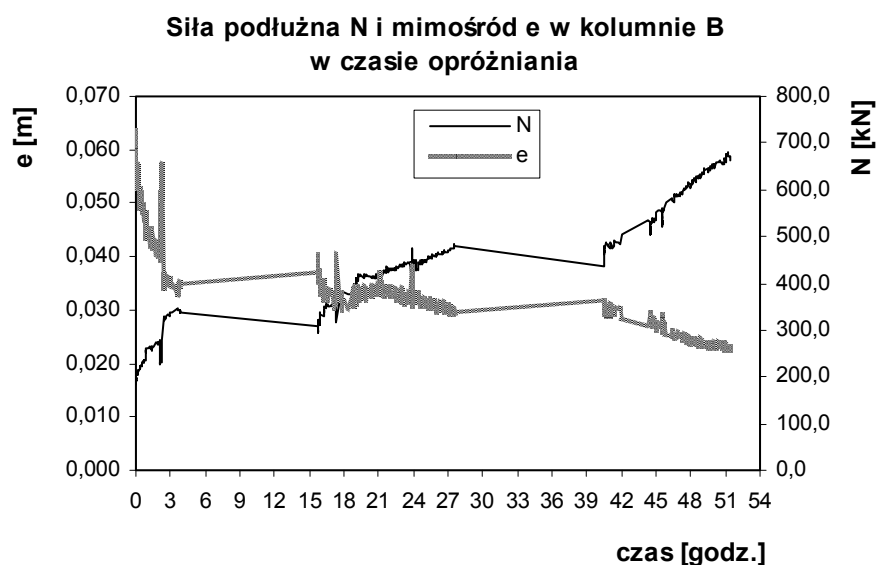


Rys. 6.13 Rozmieszczenie tensometrów w przekroju rury i wykres odkształceń przy założeniu $e_y = 0$

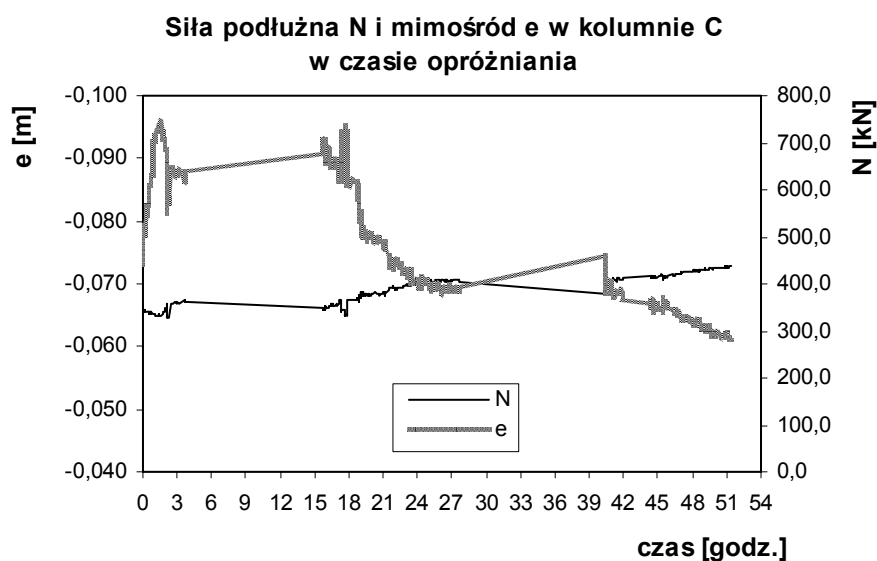
Każda z trzech kolumn podpierających ulegała głównie odkształceniom w płaszczyźnie xz . Zarejestrowane odkształcenia w płaszczyźnie yz były pomijalnie małe. Poniższe rysunki (rys. 6.14–6.17) przedstawiają obliczone na podstawie odkształceń, przyrosty sił podłużnych N i mimośrodów e_x kolumnach A, B i C oraz w ukośnej gałęzi D. Wykresy sporządzono dla przedziału czasu obejmującego początkowe 54 godziny opróżniania (z wliczonymi przerwami nocnymi), kiedy obserwowano wzrost sił w kolumnach.



Rys. 6.14 Siła podłużna N i mimośród siły e w kolumnie A w czasie opróżniania



Rys. 6.15 Siła podłużna N i mimośród siły e w kolumnie B w czasie opróżniania



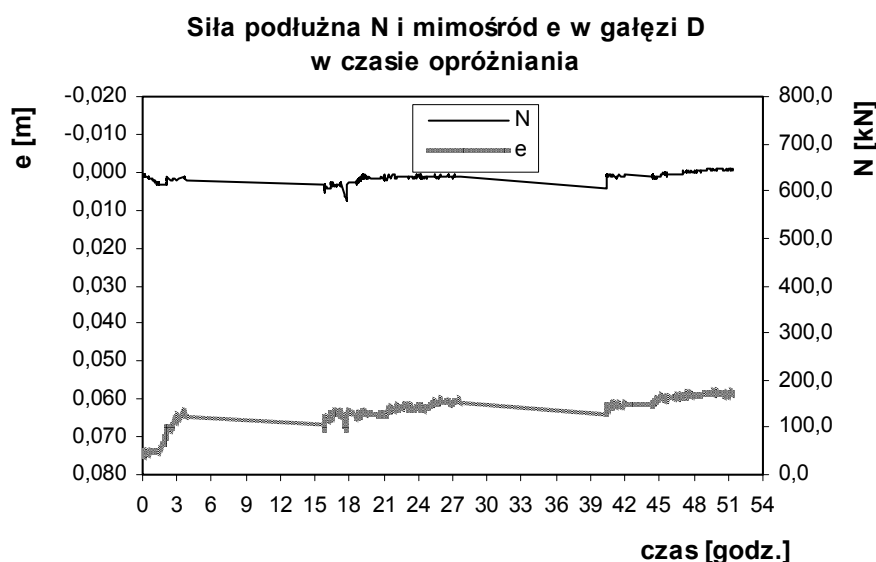
Rys. 6.16 Siła podłużna N i mimośród siły e w kolumnie C w czasie opróżniania

Analizując wykresy można stwierdzić, że obciążenie od materiału sypkiego skutkowało zwiększeniem się sił podłużnych w każdej z trzech kolumn. Obciążenie to nie miało charakteru osiowego i zwiększyło siły podłużne w ruchach powodując wystąpienie mimośrodów. Największa wartość mimośrodu wystąpiła w 1 godz. opróżniania i na początku drugiego dnia opróżniania w kolumnie C i wynosiła $|e| = 0,095\text{m} = 1,4e_r$, gdzie e_r – promień rdzenia przekroju. Z obserwacji wynika również, że w kolumnie A w czasie nocnych przestojów siła podłużna utrzymywała się na stałym poziomie, natomiast w kolumnach B i C

wartości tych sił zmniejszały się o ok. 10 %. Procesowi temu towarzyszył jednoczesny wzrost mimośrodu sił. W stadium opróżniania natomiast występowały odwrotne zależności – wzrost wartości siły podłużnej wraz ze spadkiem jej mimośrodu.

Zwraca uwagę spora różnica w wynikach pomiędzy kolumną A i C, których symetryczne usytuowanie względem osi komory sugerowałoby jednakowy charakter obciążeń. Istniejącą różnicę ($N_{Amax} = 682,5$ kN, $N_{Cmax} = 438,1$ kN) należałoby wytłumaczyć tym, że otwory perforacyjne w gałęzi podpieranej przez kolumnę A były otwarte, zaś w gałęzi C zakryte w czasie pomiarów. Musiało więc wystąpić zjawisko „podciągania” czyli ruchu materiału w pobliżu otworów perforacyjnych - stąd asymetria w siłach podłużnych.

Na rysunku 6.17 przedstawiono podobny wykres sporządzony dla ukośnej gałęzi urządzenia, którym odprowadzane było ziarno do otworu wysypowego nad taśmą rozładunkową T2.

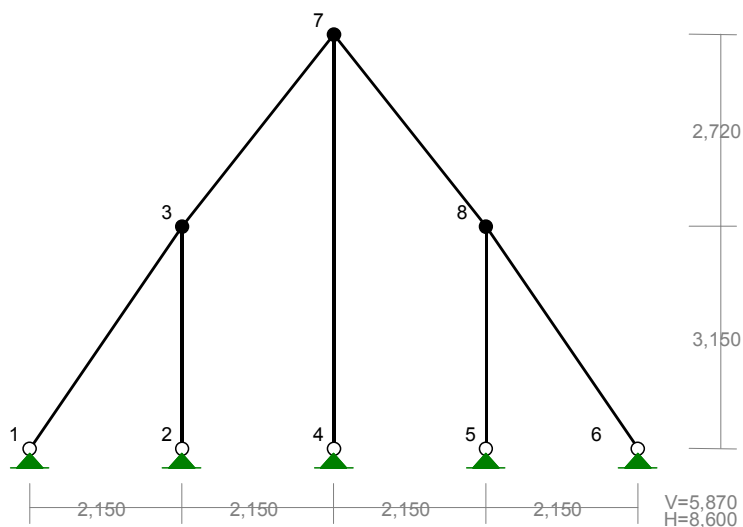


Rys. 6.17 Siła podłużna N i mimośród siły e w gałęzi D w czasie opróżniania

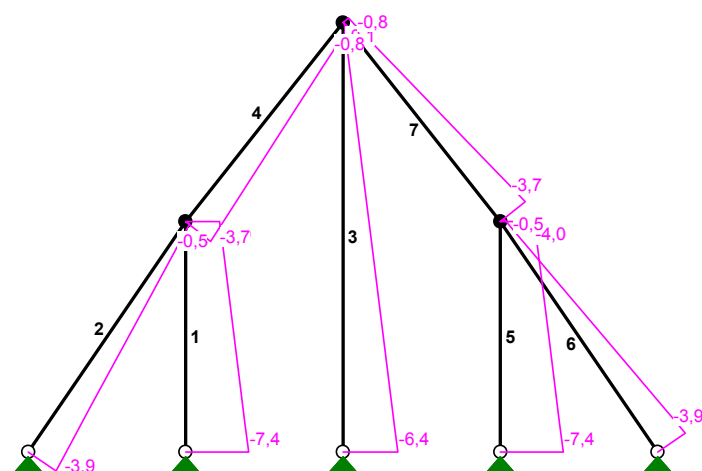
Z analizy wykresu wynika, że po zasypaniu komory rzepakiem wartość siły podłużnej ustaliła się na poziomie ok. 650 kN i utrzymywała się na tym poziomie przez cały początkowy okres rejestracji z nieznacznymi spadkami w czasie przestojów nocnych i wzrostem w czasie opróżniania. Zwraca też uwagę wartość mimośrodu siły podłużnej, która jest w pierwszych 3 godzinach opróżniania była większa od promienia rdzenia $e_r = 0,067$ m (w przekroju występuje rozciąganie), a później mniejsza i malała.

W celu oszacowania intensywności obciążeń, które wyznaczono w oparciu i pomiary, dokonano obliczeń płaskiego ustroju konstrukcji odciążającej przy życiu metody elementów skończonych. Geometrię ustroju i numerację węzłów zastosowaną w obliczeniach

przedstawiono na rysunku 6.18, zaś rozkład i wartości sił podłużnych w prętach przedstawia rysunek 6.19.



Rys. 6.18 Numeracja węzłów zastosowana w obliczeniach MES



Rys. 6.19 Siły podłużne w prętach ustroju od ciężaru własnego

W rozważaniach pominięto przestrzenną pracę ustroju z kilku powodów. Po pierwsze, obliczenia mają charakter uproszczony, a po drugie, wyniki otrzymane z pomiarów świadczą o braku istnienia dużych oddziaływań w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku 6.18 bądź 6.19. W wyniku pomiarów stwierdzono że mimośrody sił występujące na tym kierunku są pomijalnie małe (15, 20-krotnie mniejsze niż w płaszczyźnie układu). Poza tym w badanej komorze zastosowano ukośne zastrzały podpierające konstrukcję przewodów, umieszczone właśnie w płaszczyźnie prostopadłej do układu, i na podstawie powyższego można stwierdzić, że spełniły one dobrze swą rolę.

W tabelicy 6.6 zestawiono wartości sił podłużnych od ciężaru własnego obliczonych za pomocą MES i sił maksymalnych uzyskanych z badań na obiekcie oraz naprężenia w najbardziej wyężonym punkcie przekroju, obliczone na podstawie pomierzonych odkształceń. Obliczenia wykonano, przyjmując wartość współczynnika sprężystości podłużnej $E = 205 \text{ GPa}$, a przekroje przyjmowane w obliczeniach stanowiły rury $D 406,4/11\text{mm}$.

Tablica 6.6 Zestawienie sił podłużnych od ciężaru własnego obliczonych za pomocą MES i sił maksymalnych uzyskanych z badań na obiekcie, naprężenia w najbardziej wyężonym punkcie przekroju

symbol kolumny	N_{cw}	N_p	σ_{max}
	[kN]	[kN]	[MPa]
A	6,3	682,5	49,8
B	5,3	678,3	49,4
C	6,3	438,1	31,9
D	3,1	648,8	47,4

Analizując otrzymane rezultaty widać, że wartości sił podłużnych w prętach od ciężaru własnego konstrukcji są niewielkie. Największe ich wartości występują w krótkich kolumnach A i C i wynoszą 6,3 kN.

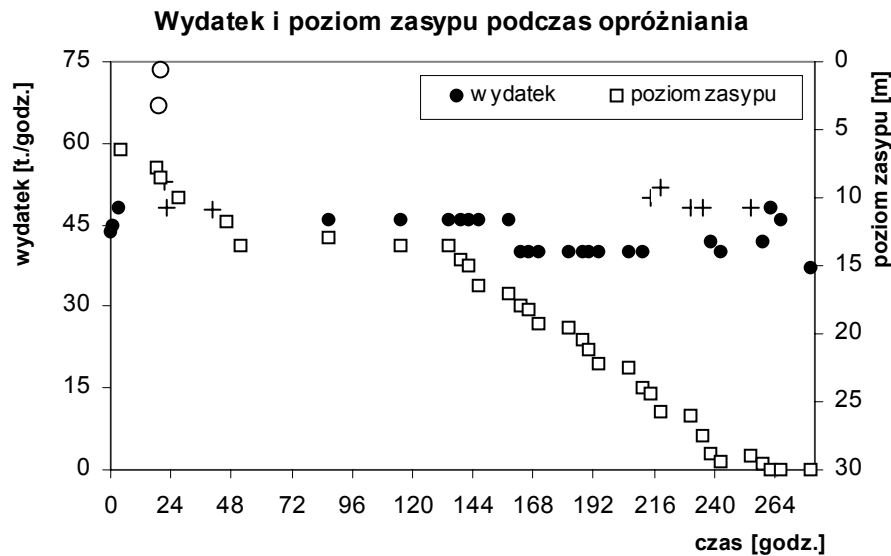
Największe naprężenia w przekrojach, spowodowane działaniem materiału sypkiego wynoszą ok. 50 MPa. Zakładając wartość wytrzymałości obliczeniowej stali na poziomie $f_d = 215 \text{ MPa}$ i przyjmując współczynnik wyboczeniowy $\varphi = 1$, stwierdza się ok. 25 % wykorzystanie nośności przekroju.

6.3.2 Inne wyniki

Rysunek 6.20 przedstawia przebieg mierzonych wartości wydatku i poziomu zasypu ziarna. Wydatek, podawany w [t./godz.] na lewej osi pionowej, mierzono przynajmniej dwukrotnie w ciągu dnia. Pomiar był wykonywany automatycznie przy użyciu wagi samoczynnej z koszem wywracającym, zainstalowanej w linii wydawania ziarna przed wialnią. Pomiary wykonane tym sposobem dotyczyły zatem masy rzepaku wpływającego wprost z komory wraz zanieczyszczeniami.

Poziom zasyp, wyrażony w metrach na prawej pionowej osi (rys. 6.20) jest odległością pomiędzy stropem zasypowym pod górną galerią ziarnem znajdującym się pod tym punktem. Wartość 30 m odpowiada stanowi, kiedy w komorze zalegają tylko strefy martwe, których

masę szacuje się na ok. 300 ton. Materiał ten nie zsypuje się grawitacyjnie (płaskie dno), lecz jest opróżniany przy użyciu łopaty mechanicznej.



Rys. 6.20 Wydatek i poziom zasypu podczas opróżniania

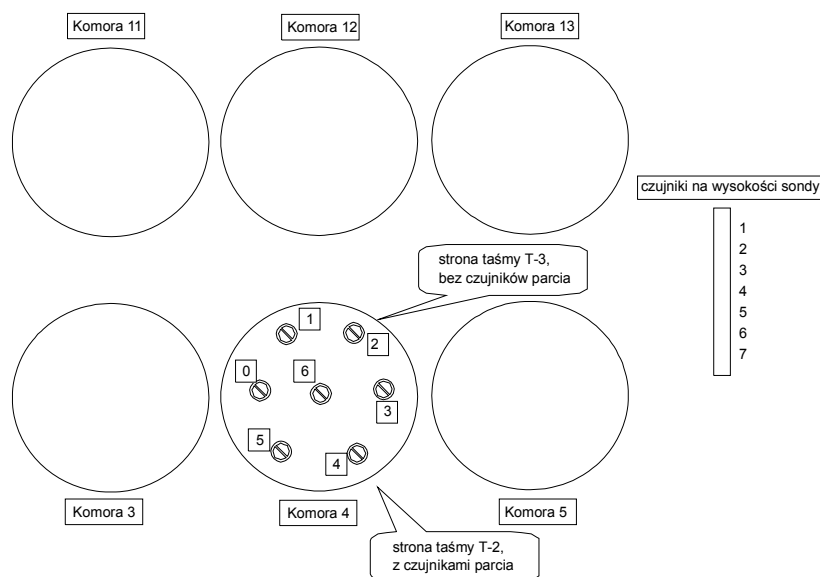
Analizując powyższe wartości i mając na uwadze tabelę 6.1 można sformułować kilka spostrzeżeń. Wydatek nie zależy od poziomu zasypu - co jest zgodne z wynikami prac [3, 7, 38, 39, 45-47, 65, 66], chociaż w drugiej części procesu opróżniania odnotowano nieznaczny jego spadek. Wartości wydatku przy stałych warunkach opróżniania (otwarty konkretny otwór) utrzymują się na stałym poziomie. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w większości przypadków komora opróżniana była przez taśmę T2 znacznik „●”, umieszczoną w tunelu z aparaturą pomiarową. Pomiary oznaczone znacznikiem „○” dotyczą opróżniania za pomocą obu taśm jednocześnie, a znacznik „+” odpowiada opróżnianiu tylko taśmą T3. Pod koniec procesu opróżniania wartości wydatku otrzymane dla taśmy T2 (●) były mniejsze niż te po stronie taśmy T3 (+). Różnica pomiędzy wartościami wydatków uzyskanymi dla obu taśm wynosiła 10-12 t./godz. i została stwierdzona dopiero pod koniec procesu opróżniania (godz. 216-250), zaś na początku opróżniania nie było istotnej różnicy. Tłumaczy się to faktem, że przewód po stronie taśmy T2 miał zamknięte otwory perforacyjne (rys. 6.2) podczas pomiarów, zaś po stronie taśmy T3 otwory te były otwarte i co najważniejsze – „działanie” otworów objawiające się zwiększeniem wartości wydatku stwierdzono dopiero pod koniec opróżniania. Jest to dowodem poprawnego przyjęcia ich wymiarów i położenia, eliminującego tzw. podciąganie materiału z niższych stref komory.

Ponadto widoczne jest, że wydatek przy otwartych dwóch otworach nie jest sumą wydatków z pojedynczych otworów (74 t./godz. < 2x43 t./godz.). Dowodzi to faktu, iż przy otwartych

dwóch otworach rury nie są wypełnione w całym przekroju, a tylko częściowo, zaś wydatek materiału wpadającego u góry do przewodów tylko częściowo pokrywa zdolność przewodów do odprowadzania materiału. Chcąc zatem zapewnić całkowite wypełnienie przewodów przy opróżnianiu obustronnym, należałoby zmniejszyć prędkość taśm opróżniających, lub, co jest łatwiejsze do wykonania, zmniejszyć szerokość otworu wylotowego.

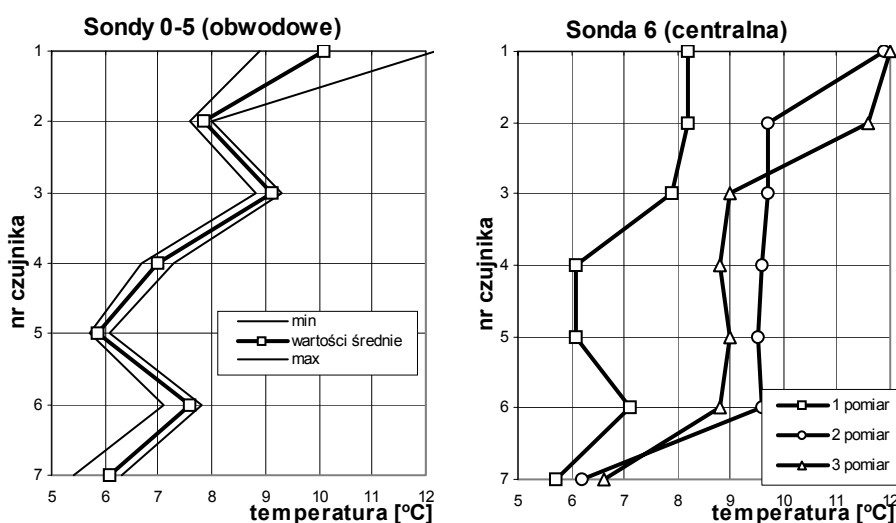
Podczas opróżniania komory poczyniono też szereg obserwacji towarzyszących temu procesowi. Obserwowano górną powierzchnię ziarna i mierzono odległość od stropu komory do powierzchni materiału pod otworem zasypowym (rys. 6.20). W początkowym okresie opróżniania (pierwsze dwa dni) występowały drgania całej konstrukcji o częstotliwości $5\div 7s.$, wyczuwalne przy otworze zasypowym na górnej galerii. Drgania te towarzyszyły każdorazowo obsunięciu się warstwy ziarna w kierunku do środka komory. Górna powierzchnia ziarna przekształcała się ze stożka skierowanego ku górze, przez poziomą płaszczyznę, do stożka odwróconego. Obserwowany był ciągły ruch materiału w górnej, widocznej warstwie, po utworzeniu się stożka odwróconego, którego wysokość oszacowano na ok. 4 m. Ziarno spływało „falami” w kierunku do środka komory cyklicznie ze wszystkich kierunków.

Przy wykorzystaniu aparatury będącej na wyposażeniu elewatora dokonano trzykrotnie w odstępach dobowych odczytu temperatury ziarna, począwszy od dnia z wypełnioną całkowicie komorą. Na rysunku 6.21 przedstawiono rozmieszczenie sond do pomiaru temperatury i usytuowanie komory.



Rys.6.21 Rozmieszczenie czujników do pomiaru temperatury

Na poniższych wykresach (rys. 6.22) przedstawiono w formie wykresów wyniki pomiaru temperatury. Temperatury na obwodzie („Sondy 0-5”) utrzymywały się na stałym poziomie, a na uwagę zasługuje sonda centralna („Sonda 6”), wokół której wartości temperatur miały widoczny przebieg w czasie. W początkowym stanie, przy pełnej komorze, górne warstwy materiału (czujnik 1) miały nieco wyższą temperaturę niż warstwy w poziomie środkowych czujników. Po dwóch dobach materiał cieplejszy z górnej części przemieścił się w dół – stąd podwyższenie temperatury w środkowej części sondy (przy stałych temperaturach na sondach obwodowych). Taki rodzaj przegrupowania temperatur jest też dowodem powstania w osi komory centrycznego kanału przepływu i potwierdza poprawne działanie urządzenia odciążającego.



Rys. 6.22 Wyniki pomiarów temperatury ziarna za pomocą sond

6.4 Wnioski

Na podstawie poczynionych badań można wysnuć następujące wnioski.

Przepływ w komorze wyposażonej w rurowe urządzenie odciążające ma charakter quasistatyczny, natomiast przepływ w przewodzie ma wyraźne cechy dynamiczne z oscylacjami.

Obciążenia ukośnych ramion przewodów są największe w początkowym okresie opróżniania (napór ok. 170 kPa), w późniejszym okresie obniżają się i utrzymują na stałym poziomie (od 12 do 60 kPa).

Siła podłużna w nachylonym ramieniu urządzenia utrzymuje się podczas opróżniania na stałym poziomie (ok. 600 kN), natomiast siły w kolumnach pionowych, podpierających ramiona ukośne, maleją wraz z upływem czasu.

Pomierzone wydatki opróżniania pokazują, że rury mają większą zdolność przepustową niż objętość wpadającego od góry do urządzenia materiału – przepustowość rury jest większa niż wydajność otworu wysypowego.

Rozkłady temperatur przemieszczającego się ziarna dowodzą prawidłowego działania urządzenia – kanał przepływu tworzy się w osi pionowej komory, podczas gdy strefy bliżej ścian pozostają w bezruchu.

I tak, np. 15,75 oznacza odczyt wykonany po 15 godz. i 45 min. od początku opróżniania.

Na rysunku umieszczono wykres odpowiadający naporom w obiekcie naturalnych rozmiarów, obliczonym według teorii Janssena dla napełniania. Zwraca uwagę duża różnica pomiędzy współczynnikami bezwymiarowymi odpowiadającymi teoretycznym naporom po napełnieniu i naporom pomierzonym w czasie opróżniania obiektu. Zdaniem autora fakt ten dowodzi poprawności działania urządzenia odciążającego – napory poziome towarzyszące opróżnianiu są znacznie mniejsze od teoretycznych dla napełniania.

Powyższy rysunek zawiera wyniki badań modelowych jedynie dla dwuramiennych urządzeń odciążających. Wykresy współczynników dla modelu mają podobny do siebie przebieg. Porównując zaś współczynniki dla modelu ze współczynnikami na obiekcie naturalnym widać również duże podobieństwo wykresów. Kolejnym dowodem skuteczności działania urządzenia zainstalowanego na obiekcie są mniejsze wartości współczynników bezwymiarowych dla obiektu niż dla modelu.

Najbardziej zbliżone do obiektu naturalnego wyniki mają modele IIb, IIc i IIe, przy czym nie ma tu większego znaczenia rodzaj i wielkość otworu perforacyjnego.

Współczynniki α dla naporów mierzonych czujnikami umieszczonymi na ściankach przewodów w modelu charakteryzują się największymi wartościami ze wszystkich pomierzonych. Zdaniem autora, spowodowane jest to geometrią komory modelowej, która była półwalcowa, opróżniana przez otwory umieszczone przy ścianie, a zatem niecentrycznie. Otwory te (wloty do rur) były umieszczone wyżej niż zwykle (na poziomie górnych końców przewodów), ale mimo wszystko materiał napierał na przednią ścianę bardziej niż na półwalcową boczną. Zatem naprężenia w ośrodku sypkim przy przedniej ścianie zwiększały się, a z tyłu materiał się odprężał w miarę postępu opróżniania.

Zdaniem autora, porównanie badań modelowych (w skali 1:20) z badaniami na obiekcie dało zadowalające wyniki i dowodzi, że prowadzenie badań naporów w tej skali odzwierciedla dość dobrze charakter przepływu i wartości naporów występujące na obiekcie.

8. Symulacja numeryczna przepływu materiału sypkiego

8.1. Modele ciągłe a modele dyskretne

Wśród istniejących modeli teoretycznych płynącego materiału sypkiego można rozróżnić modele ciągłe i traktujące materiał sypki jako zbiór odrębnych cząstek. Modele ciągłe w obliczeniach numerycznych wykorzystują zwykle metodę elementów skończonych. Modele dyskretne zaś opierają się na algorytmach dynamicznych, teoriach kinetycznych lub automatach komórkowych. Modele ciągłe lepiej opisują przepływy powolne (analogicznie do płynów określane jako laminarne). Podczas takiego przepływu naprężenia wewnętrzne w materiale pochodzą od międzycząsteczkowych sił normalnych i stycznych. Dysypacja energii w przepływie powolnym występuje na skutek tarcia między cząstkami. Modele dyskretne dają satysfakcjonujące wyniki w odniesieniu do przepływów szybkich (burzliwych). Materiał sypki zachowuje się wtedy jak gęsty płyn lub gaz. Naprężenia wewnętrzne pochodzą zarówno od sił normalnych i stycznych jak i od zderzeń cząstek. Straty energii są znaczniejsze na skutek występowania niesprężystych zderzeń.

Oba rodzaje przepływów mogą występować równocześnie w procesie opróżniania silosu w różnych jego obszarach. W pobliżu otworu wysypowego materiał zwykle płynie szybciej niż w wyższych partiach komory.

8.2. Klasyfikacja automatów komórkowych

Automat komórkowy (ang. *lattice-gas automata*, *cellular automata model*) to płaski lub przestrzenny system komórek (celek). W pojedynczym kroku iteracji każdą z komórek może zajmować jedna cząstka materiału lub komórka może pozostawać pusta. Przepływ polega na przemieszczaniu się cząstek w kierunku do pustej komórki sąsiedniej. I tak, przepływ grawitacyjny ku dołowi jest przemieszczaniem się (migracją) cząstek w dół, co jest równoznaczne z migracją pustek ku górze. Przepływ inicjowany jest przez zdefiniowanie pustych komórek w miejscu otworu wysypowego.

Istnieje szereg modeli różniących się stopniem złożoności, rodzajem siatek: dwuwymiarowe prostokątne, trójkątne, heksagonalne, przestrzenne. Głównym kryterium decydującym o doborze modelu są tzw. reguły (schematy) migracji, które rządzą przepływem oraz dodatkowe parametry (np. minimalizacja energii, wpływ kohezji, wielkości cząstki, itp.). Wszystkie parametry ustalane są najczęściej drogą weryfikacji doświadczalnej. Niektóre modele są

synchroniczne. W takich modelach reguły migracji są dwustopniowe – „interakcja–propagacja” w modelu energetycznym i „propagacja–kolizja” w modelu hydrodynamicznym. W modelach asynchronicznych stosuje się metodę przeszukiwania obszaru przepływu w poszukiwaniu pustek a reguły migracji opierają się na przepływie w kierunku zdefiniowanym (grawitacja). Istnieje szereg modeli różniących się stopniem złożoności, rodzajem siatek, modele płaskie i trójwymiarowe. W bardziej zaawansowanych modelach [5, 35] uwzględnienia się siły inercji i straty energii pochodzące od zderzeń międzycząsteczkowych.

8.3 Automat komórkowy z wdrożonymi cechami fizycznymi materiału sypkiego

Model automatu komórkowego zaproponowany przez Baxtera i Behringera [1, 2] opiera się na regularnej trójkątnej siatce dwuwymiarowej z heksagonalną symetrią. Pola siatki mogą być zajmowane przez ścianę lub ziarno, mogą też być puste. Ściany są przyporządkowane do siatki na stałe i nie zmieniają położenia.

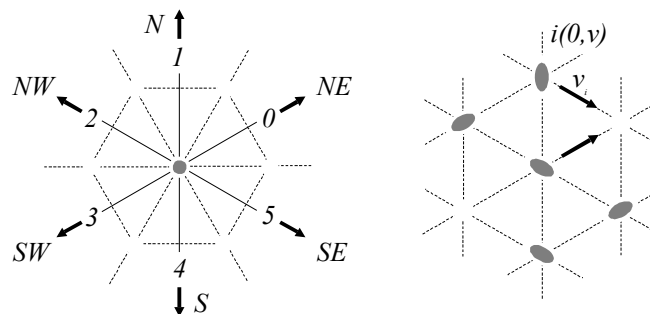
Ziarno w miejscu i ma stan i i położenie O , oraz kierunek ruchu v . Położenie O jest istotne dla ziaren niesferycznych takich jak trawa, ryż i może przyjmować jeden z trzech kierunków, tzn. równoległy do wektora normalnego siatki (pionowy) lub $\pm 60^\circ$. Wektor v może być skierowany ku jednemu z sześciu sąsiadów lub ziarno może być w spoczynku. Układ siatki i konwencję znakowania przedstawia rysunek 8.1.

Automat używa dwustopniowych reguł migracji:

1. krok interakcji (IS),
2. krok propagacji (PS).

W kroku 1 odbywa się interakcja - określanie położenie O i kierunku ruchu v każdej pojedynczej i -tej cząstki, przez minimalizowanie funkcji energii określonej wzorem:

$$E_i = E_{grav} + \sum_{NN} E_{iter} \quad (8.1)$$



Rys. 8.1 Heksagonalna siatka z kierunkami głównymi i konwencją znakowania (a) i dwuelementowy opis stanu ziarna (b)

Energia E_i zależy od położenia ziarna w miejscu i oraz położenia wszystkich sześciu najbliższych sąsiadów w poprzedniej iteracji $n-1$. Wartość E_i jest wyliczana dla wszystkich 21 możliwych położen ziarna w miejscu i . Zakłada się również, że zwrot prędkości v może być tylko w kierunku do pustej komórki. Jeżeli kilka sąsiednich położen ma tę samą energię, wybierane jest losowo jedno.

W kroku propagacji każde ziarno uzyskuje nowe położenie w siatce zgodnie z kierunkiem v , wybranym w kroku iteracji. Jeśli więcej niż jedno ziarno będzie skierowane w tym samym kierunku, w nowe miejsce będzie przesunięte ziarno z minimum energii E_i a pozostałe ziarna nie zmienią położenia. Krok propagacji kończy n -tą iterację.

Występujący we wzorze (8.1) człon E_{grav} przyjmuje wartość $E_{grav} = \Delta$, jeśli jedno lub więcej przyległych oczek poniżej jest otworami i kierunek wektora v nie jest skierowany ku nim lub $E_{grav} = 0$ w pozostałych przypadkach.

Człon E_{iter} uwzględnia interakcję ziarna z najbliższymi sąsiadami:

$$E_{iter} = F_{shear}^{\alpha} F_{orient}^{\beta} F_{dilation}^{\gamma} \quad (8.2)$$

w szczególności:

$$F_{shear} = |v_N - v_i| + 0,1 \quad (8.3)$$

jest członem uwzględniającym ruch względem sąsiada, gdzie v_N jest kierunkiem ruchu sąsiada w $n-1$ iteracji, a v_i jest możliwym kierunkiem ruchu w n -tej iteracji.

Człon F_{orient} może przyjmować wartości $F_{orient} = S$, jeśli oba rozpatrywane ziarna mają położenie zgodne z wektorem prędkości, i $F_{orient} = 1$ w pozostałych przypadkach. Dla ziaren sferycznych $S = 1$.

Człon $F_{dilation}$ uwzględniający zjawisko dylatacji ziaren przyjmuje wartość:

$$F_{dilation} = \frac{1}{d} \quad (8.4)$$

jeśli $d \leq \frac{1}{1-C}$, gdzie C jest parametrem w zakresie $0 \leq C < 1$ odpowiadającym kohezji.

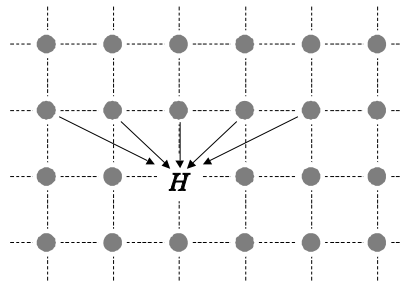
W pozostałych przypadkach przyjmuje się $F_{dilation} = 0,2$.

Wykładniki α, β, γ dają możliwość zmiany nacisku na poszczególne człony.

Zaznaczyć należy, że kalibracja automatu komórkowego odbywa się w drodze badań doświadczalnych z użyciem materiału sypkiego a więc stałe regulujące intensywność poszczególnych członów dobierane są również w drodze doświadczeń.

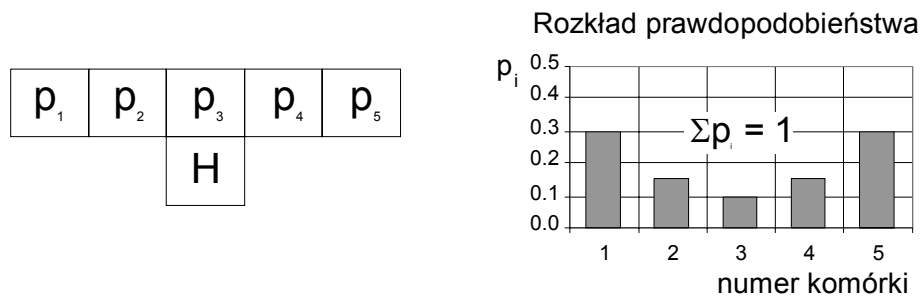
8.4 Probabilistyczny automat komórkowy

Kinematyczny asynchroniczny automat komórkowy opracowany przez Kozickiego i Tejchmana [33, 34, 35] wykorzystuje jako reguły migracji wagi prawdopodobieństwa. I tak, dla modelu płaskiego zakłada się w kolejnym kroku iteracji, że do rozpatrywanego otworu H może przemieścić się ziarno pochodzące z jednej z pięciu komórek położonych w wyższej warstwie (rys. 8.2).



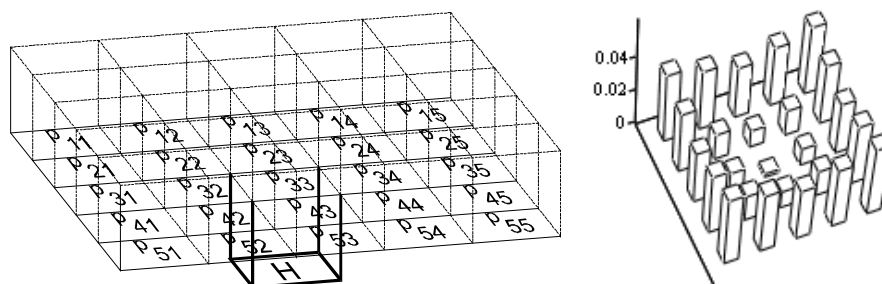
Rys.8.2 Prostokątna płaska siatka w modelu Kozickiego i Tejchmana [34]

Z badań doświadczalnych [35] wynika, że najbardziej zbliżone wyniki obliczeń numerycznych można osiągnąć definiując wagi prawdopodobieństw jak na rysunku 8.3.



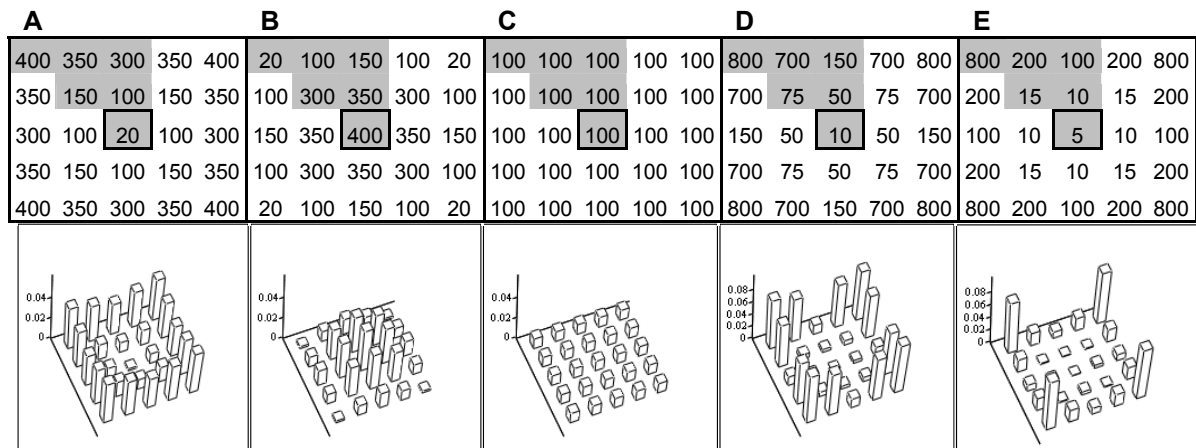
Rys. 8.3. Reguły migracji w płaskim modelu Kozickiego i Tejchmana [34]

W modelu przestrzennym natomiast, wagi powinny być przyjmowane jak na rysunku 8.4.



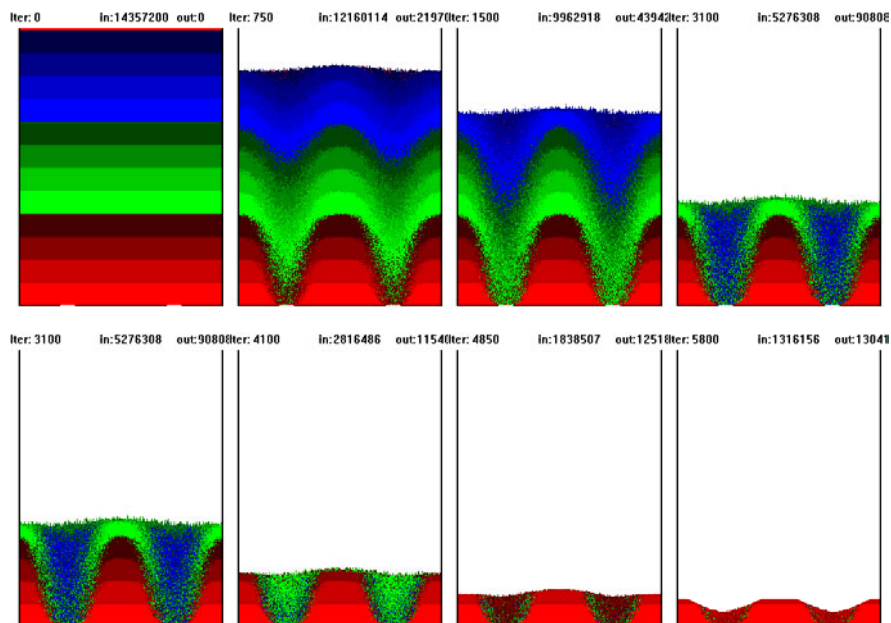
Rys.8.4. Reguły migracji w modelu przestrzennym

Jak wspomniano wyżej (pkt 8.3), automaty komórkowe są narzędziem kalibrowanym na drodze eksperymentu, obliczenia wykonano zatem dla różnych rozkładów wag prawdopodobieństwa, dążąc do uzyskania obrazu przepływu możliwie zbliżonego do wyników doświadczeń. Konfiguracje wag prawdopodobieństwa przyjmowane w obliczeniach przedstawiono na rysunku 8.7.



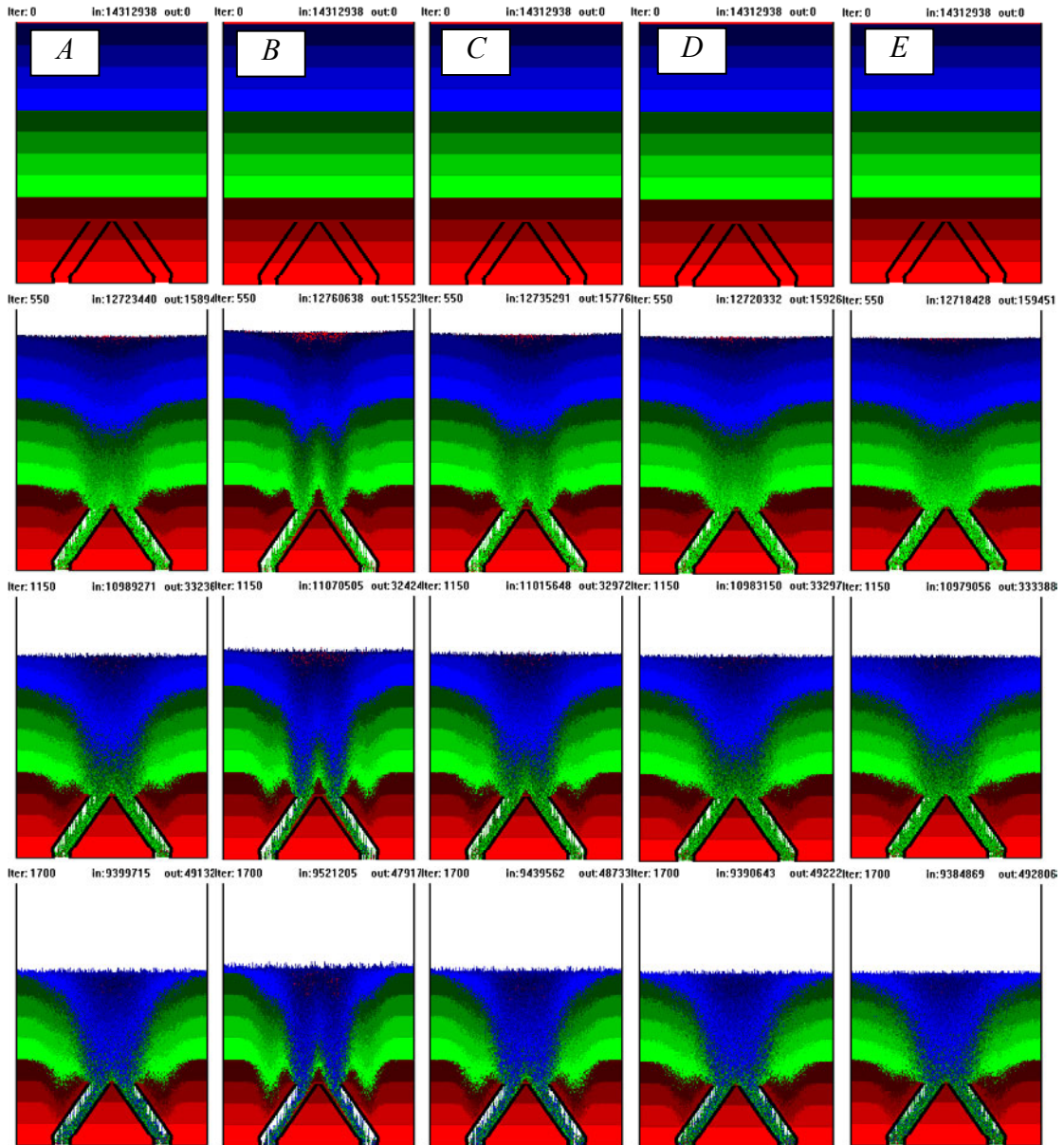
Rys. 8.7. Konfiguracje wag prawdopodobieństwa przyjmowane w obliczeniach numerycznych

Rezultatem obliczeń wykonanych w oparciu o automat komórkowy są barwne obrazy przekrojów pionowych przez komorę, wykonywane w zadanych odstępach (np. co drugą, co setną iterację). Na rysunku 8.8 przedstawiono obrazy przepływu w kolejnych, wybranych iteracjach dla modelu bez przewodów odciażających, opróżnianego przez dwa otwory.

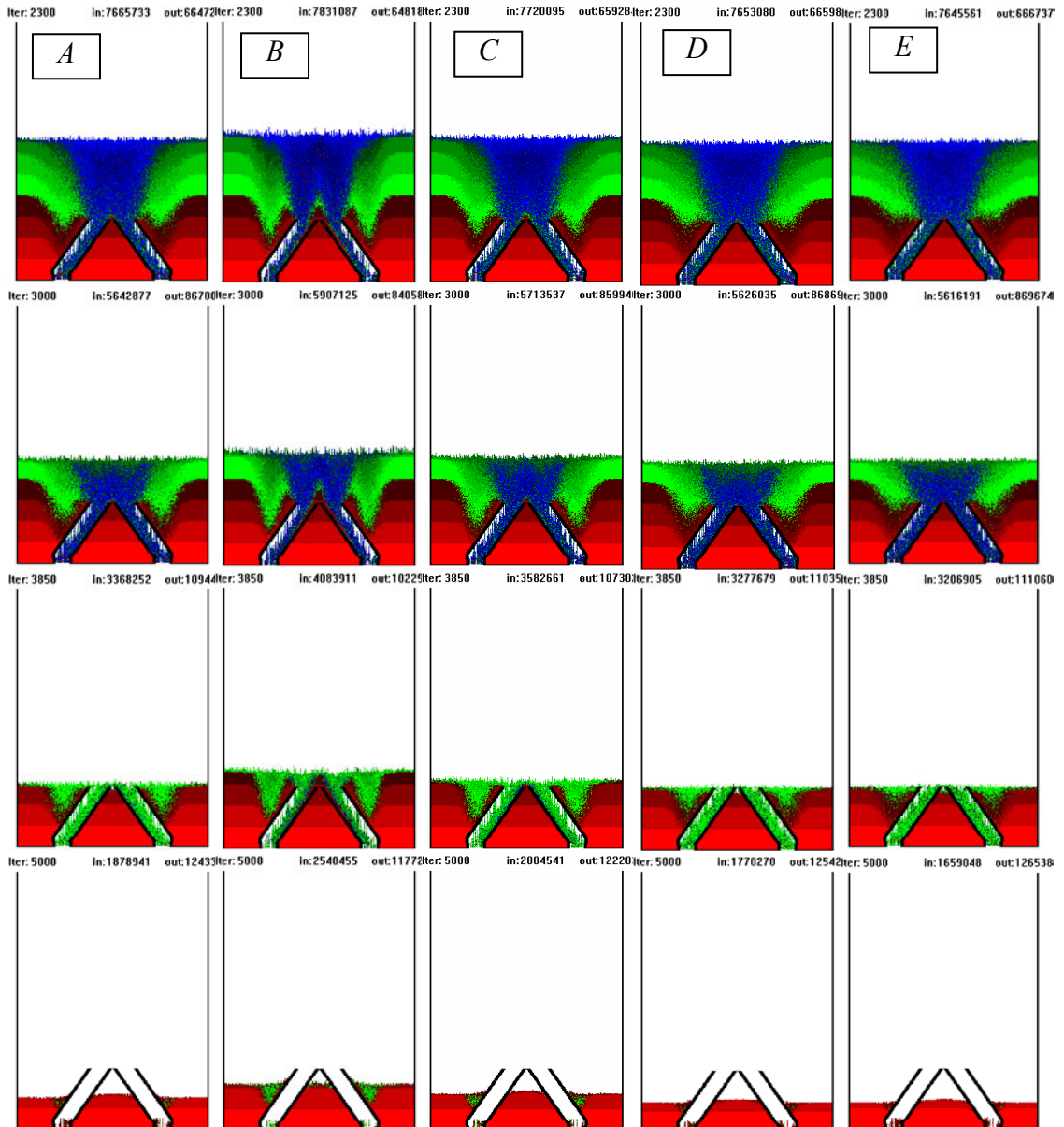


Rys. 8.8. Przekroje pionowe przez komorę bez przewodów opróżnianą dwoma otworami (konfiguracja A)

Poniżej (rys. 8.9 i rys. 8.10) przedstawiono porównanie obrazów przepływu zarejestrowane w przy opróżnianiu komory przy użyciu dwuramiennego urządzenia odciażającego, posiadającego w dolnej części ukośnych rur obustronne otwory perforacyjne usytuowane jak w badaniach modelowych, opisanych w punkcie 5.9 pracy (model Ia).



Rys. 8.9. Porównanie obrazów przepływu w tych samych iteracjach dla różnych konfiguracji wag (dużą literą oznaczono nazwę konfiguracji – według rysunku 8.7)

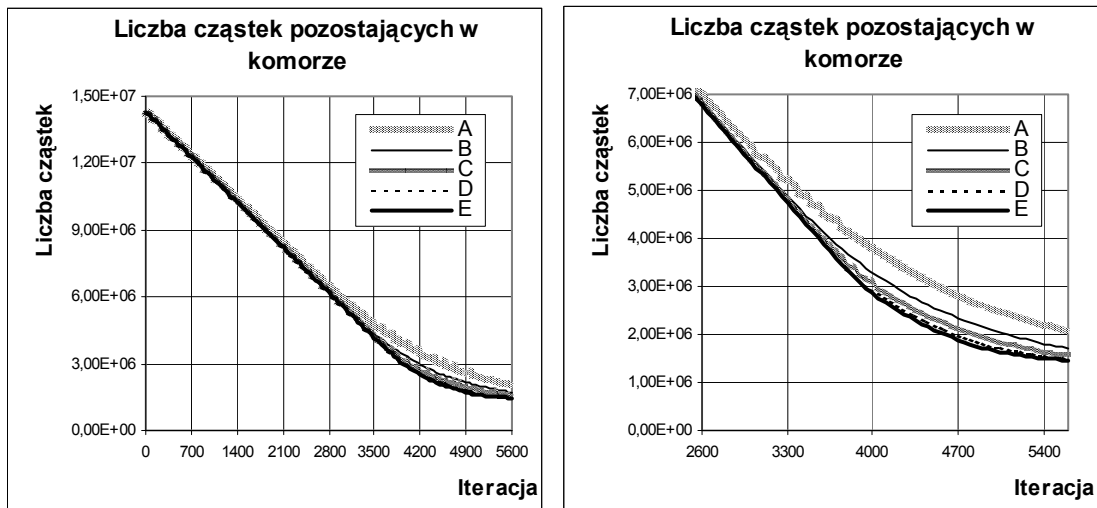


Rys. 8.10. Kolejne obrazy przepływu w tych samych iteracjach dla różnych konfiguracji wag

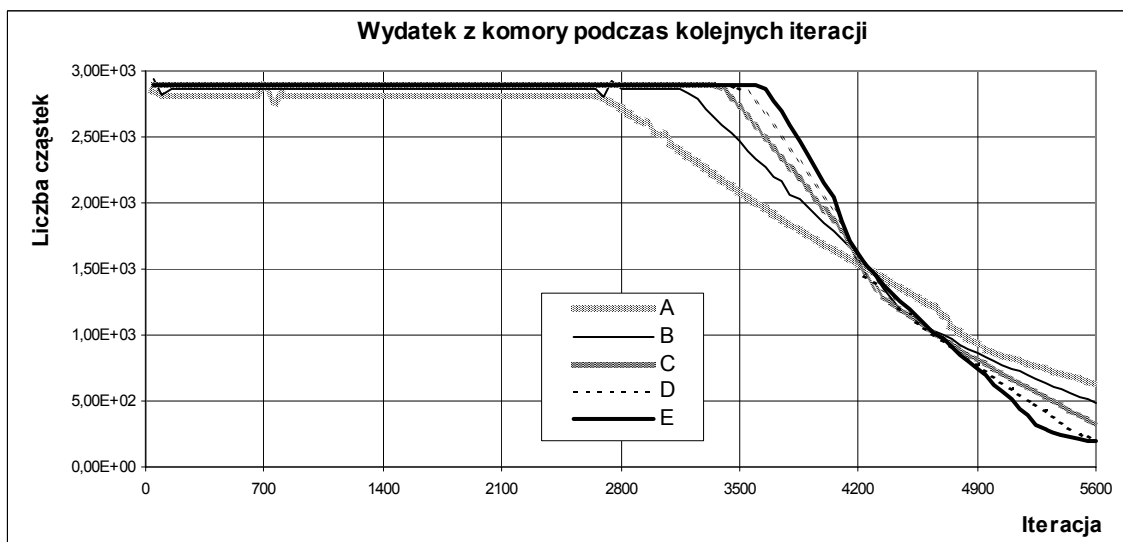
Z analizy obrazów przepływu wynika, że najbardziej zbliżonym do badań eksperymentalnych, opisanych w punkcie 5.9 pracy jest przepływ w konfiguracji wag typu A. Charakteryzuje się on prawidłowym kształtem rdzenia przepływu, zbliżonym do elipsoidy obrotowej i łagodnymi kątami stoku naturalnego spływających warstw. W przepływie tym zarejestrowano również najbardziej intensywne wypełnienie przewodów odciażających. przepływy w konfiguracji B i C charakteryzują się zbyt ostrymi kątami nachylenia warstw (kątami stoku naturalnego), co za tym idzie widoczne są w tych modelach silne, nienaturalne depresje (przesklepienia) nad otworami perforacyjnymi i nad wlotem do przewodów (zwłaszcza w modelu B). Należy zaznaczyć, że w każdym z opisanych modeli górna

powierzchnia materiału pozostaje prawie płaska, co nie jest zgodne z wynikami badań doświadczalnych.

Na podstawie rejestrowanych obrazów możliwa była analiza ilości cząstek wypływających z komory podczas opróżniania (pozostających w komorze). Poniższe wykresy sporządzone dla różnych konfiguracji wag obrazują odpowiednio ilość cząstek pozostających w komorze (rys. 8.11) i wydatek wypływających cząstek (rys. 8.12).



Rys. 8.11. Liczba cząstek pozostających w komorze podczas opróżniania

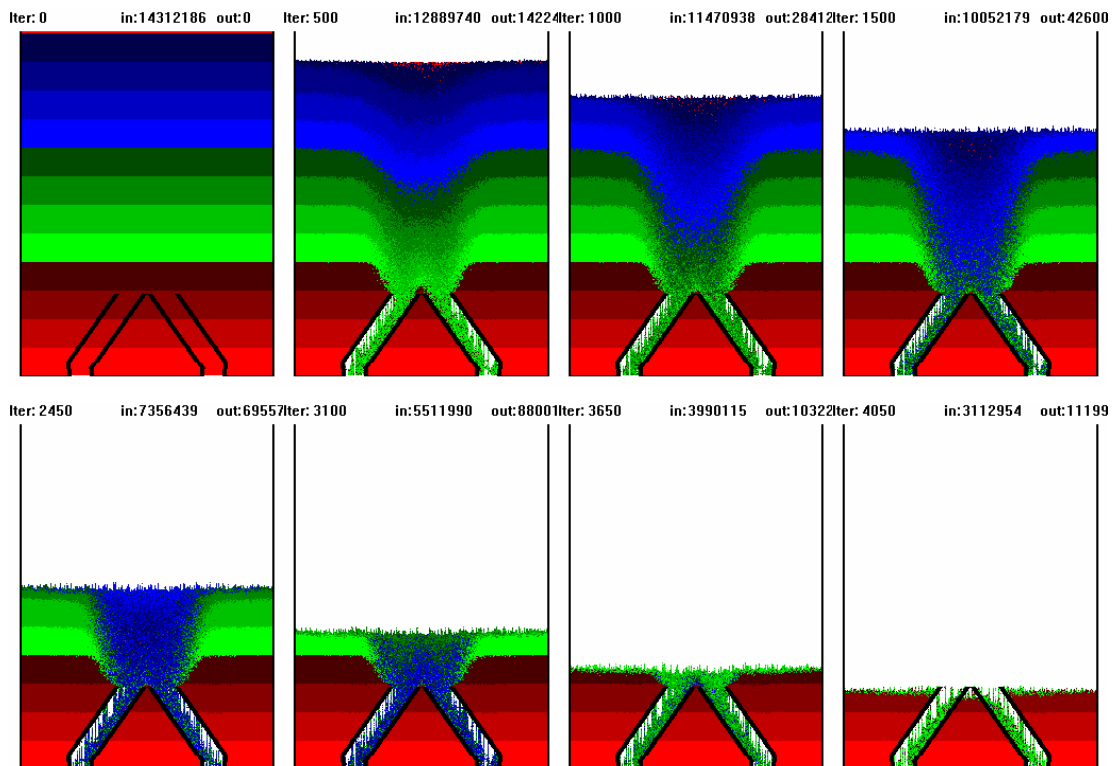


Rys. 8.12. Wydatek podczas opróżniania dla różnych konfiguracji

Z analizy wykresów wynika, że w pierwszej części procesu opróżniania liczba cząstek pozostających w komorze jest niemal identyczna. Rozbieżności występują od ok. 3000 iteracji. Co ciekawe, nie jest to moment opróżnienia górnej części materiału do górnego

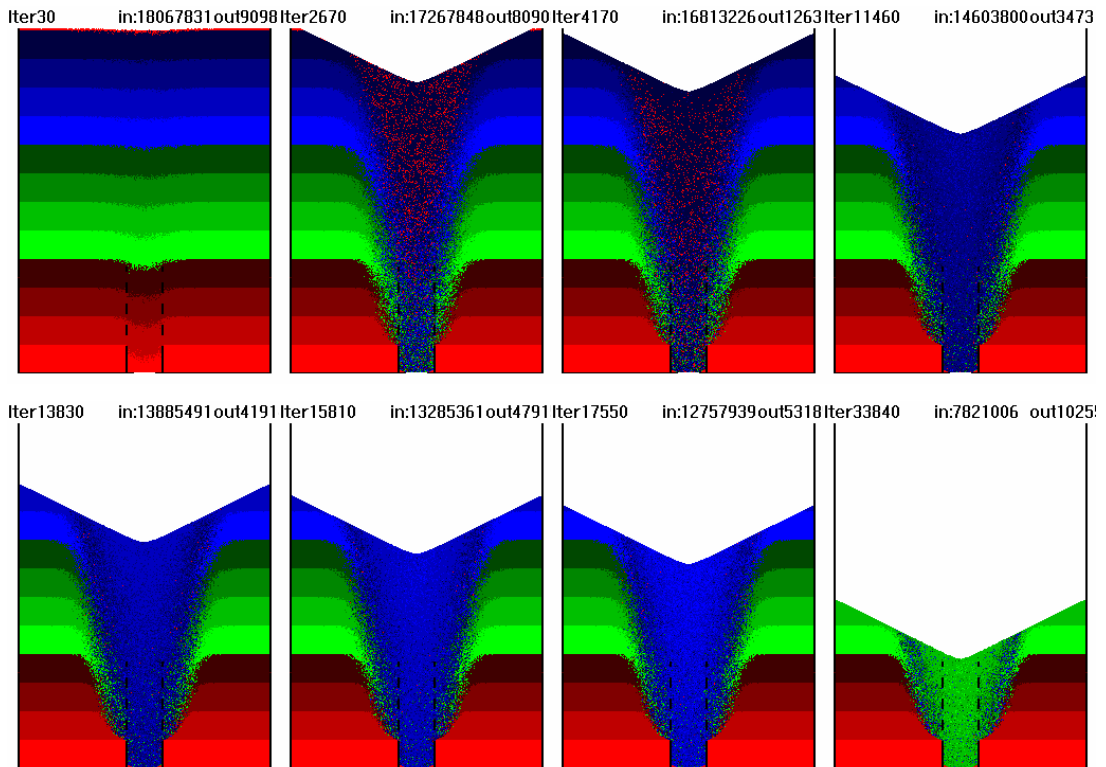
poziomu rur. Moment ten występuje w czasie ok. 3850 iteracji (rys. 8.10) i nie jest wyraźnie widoczny na powyższych wykresach. Z kolei krzywe wydatku (rys. 8.12) zaczynają opadać w momencie ok. 2600-3600 iteracji (w różnych miejscach dla różnych konfiguracji wag), a ich nachylenia są podobne. W końcowej fazie opróżniania wydatek spada do poziomu 300 cząstek/iterację (dziesięciokrotnie mniejszy niż na początku).

Poniższy rysunek (8.13) obrazuje fazy przepływu w komorze z urządzeniem odciążającym bez otworów perforacyjnych. W poszczególnych fazach przepływu występuje tylko ruch w głównym rdzeniu przepływu. Nie ma zaś ruchu w kierunku ku dolnym końcom ramion przewodów, jak ma to miejsce na rysunkach 8.9 i 8.10. Również w tym przypadku górna swobodna powierzchnia materiału pozostaje pozioma, co jest niezgodne z wynikami eksperymentalnymi.



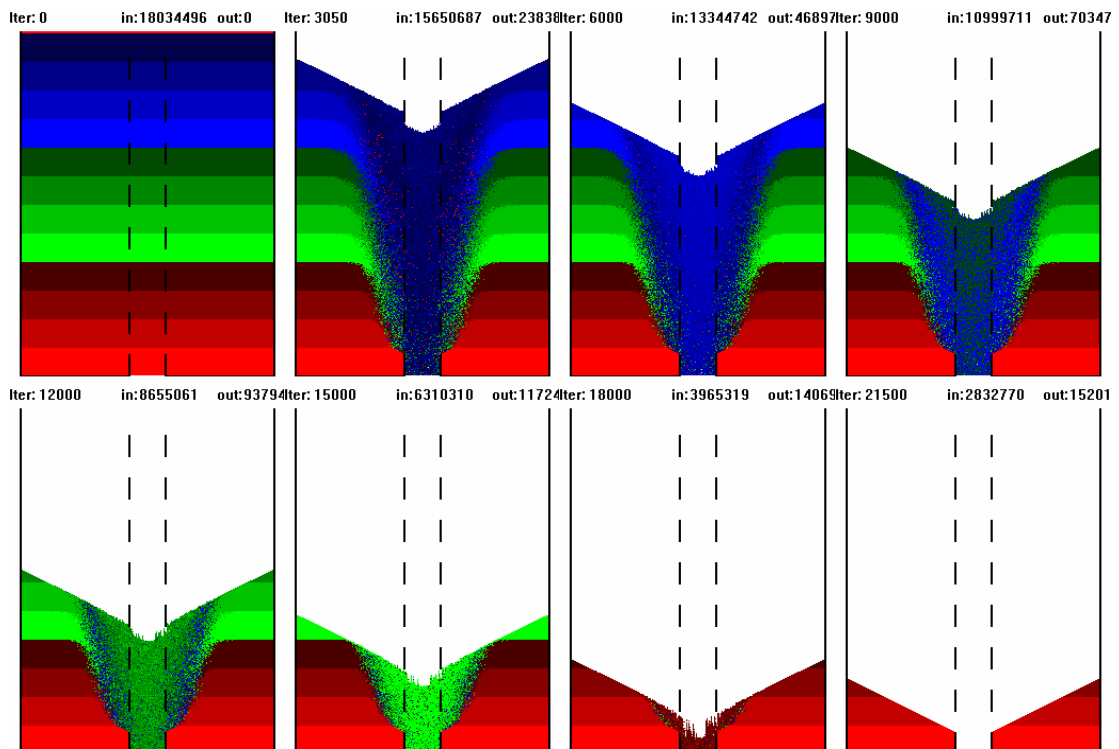
Rys. 8.13 Przekroje pionowe przez komorę z przewodami bez otworów (konfiguracja A)

Na rysunku 8.14 przedstawiono obrazy przepływu w kolejnych, wybranych iteracjach w modelu wyposażonym w pionowy króciec rozładowniczą, opisaną w pracy [23]. Centralnie umieszczony nad otworem wysypowym perforowany przewód zajmuje ok. 1/3 wysokości komory. W rozwiązaniu tym średnica przewodu wynosi 1/10 średnicy komory, a głównym jego zadaniem jest centrowanie przepływu i podniesienie punktu przecięcia strefy martwej ze ścianą, tzw. *transition point*.



Rys. 8.14 Przekroje pionowe przez walcową komorę z króćcem centrującym przepływ

Rysunek 8.15 obrazuje fazy przepływu w komorze z kolumną rozładowniczą zajmującą całą wysokość silosu. Wyniki badań skuteczności i obciążeń takich przewodów można znaleźć m.in. w pracach [24, 27, 70, 71].



Rys. 8.15 Przekroje pionowe przez komorę z kolumną rozładowniczą zajmującą całą wysokość komory

Cechą wspólną dwóch powyższych przepływów jest wytworzenie jednego głównego kanału przepływu. pod względem czasu obliczeń, prawie dwa razy krócej trwała symulacja z przewodem zajmującym całą wysokość komory – 21500 iteracji, w odróżnieniu od króćca – 51500 iteracji.

8.6 Wnioski

W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano obrazy przepływu zarejestrowane w zadanych iteracjach. Dla dwuramiennych przewodów odciążających określono konfigurację prawdopodobieństw dającą najbardziej zbliżone do eksperymentu wyniki – jest to konfiguracja A (rys. 8.7). Przeprowadzono też symulację w komorze z pionowymi kolumnami rozładowniczymi, spotykanymi w literaturze.

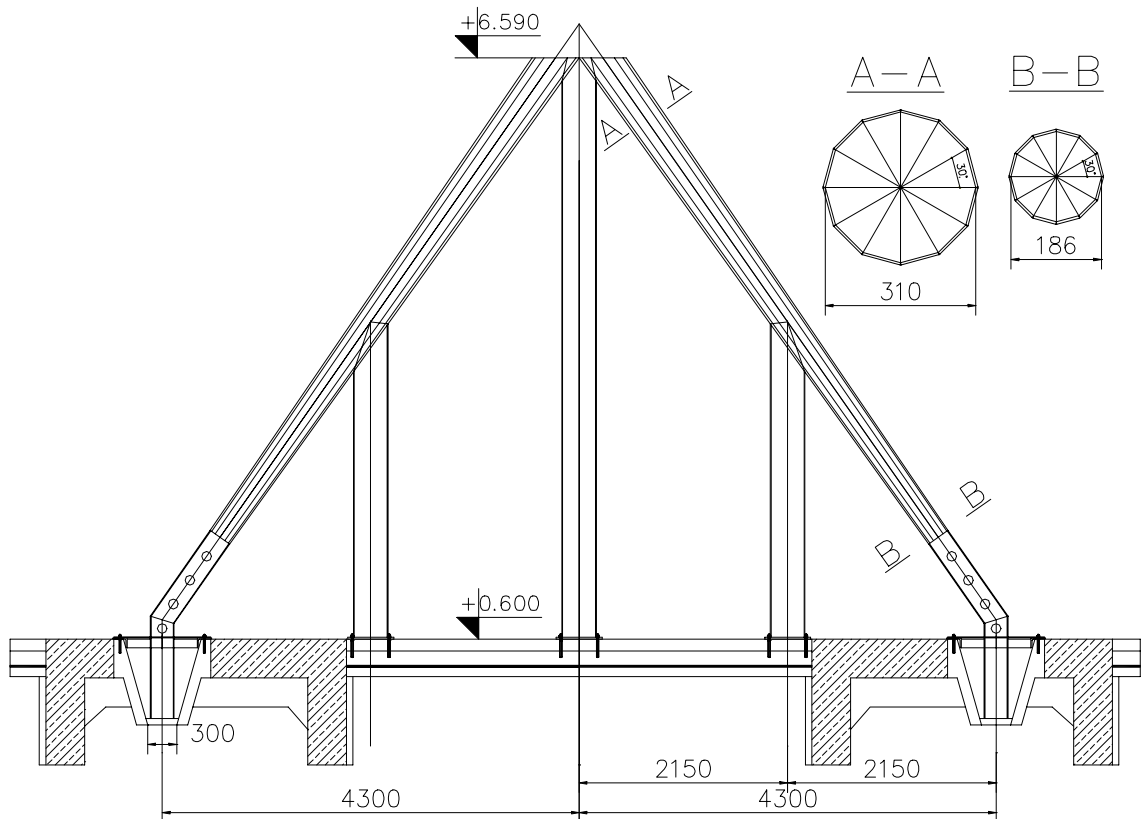
Probabilistyczny automat komórkowy jest dobrym narzędziem do symulacji przepływu w osiowosymetrycznych komorach z elementami pograżonymi w materiale sypkim. Dzięki obrazom, rejestrowanym w wybranych, wcześniej zdefiniowanych iteracjach, możliwa jest analiza deformacji poruszających się warstw materiału sypkiego. Połączenie zaś kolejnych obrazów daje w wyniku swoistą sekwencję – film, obrazujący przepływ w czasie. Analizie można poddawać wszelkie rodzaje komór z dowolnymi warunkami brzegowymi. Jedynym ograniczeniem jest wielkość zadania, którego czas obliczeń zależy liniowo od ilości komórek (rozwiązanie zadania z ok. 20 mln. komórek trwało 136 godzin).

Stwierdzono, że obrazy przepływu wykonane w automacie odbiegają od wyników eksperymentów doświadczalnych. Dotyczy to w szczególności kształtu górnej swobodnej powierzchni materiału i zachowania się materiału w pobliżu otworów perforacyjnych w przewodach. Górna powierzchnia w symulacjach dwuramiennych przewodów pozostaje płaska, co jest niezgodne z obserwacjami na modelu – pkt 5.9.2. Drugą problematyczną cechą przepływów uzyskaną w automacie jest intensywne „podciąganie w pobliżu perforacji”. Symulacje pokazały, że nawet najmniejsze otwory w przewodach powodują to niekorzystne dla ich skuteczności zjawisko – nie znalazło to potwierdzenia w badaniach doświadczalnych, gdzie określono optymalną średnicę perforacji, nie powodującą „podciągania”.

Z uwagi na czysto kinetyczny charakter automatu komórkowego, wykorzystanego w obliczeniach, niemożliwe było wychwycenie zjawisk dynamicznych, towarzyszącym przepływowi. Nie można zatem korzystając z tego rodzaju narzędzia określić rozkładu, wartości i charakteru obciążeń w ośrodku sypkim. Niemożliwe jest też ilościowe określenie przyspieszeń materiału w przewodach i sił bezwładności ośrodka sypkiego.

9. Propozycje rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń odciążających

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na uściślenie przyjętych założeń i modyfikację rozwiązań urządzeń odciążających stosowanych w silosach średnicy $D = 19$ m. Na poniższych rysunkach (rys. 9.1 i 9.2) przedstawiono dwa warianty urządzeń odciążających, których rozwiązania uwzględniają wyniki badań zawartych w niniejszej pracy. Głównymi elementami w wariantcie I są nachylone pod kątem 55° przewody zwięzające się ku dołowi. Górny odcinek wykonany jest w postaci ściętego graniastosłupa o 12 bokach, a dolny stanowi rura $244,5/8,0$ mm. Całość podpierają trzy kolumny z rur $355,6/8,0$. Z przeprowadzonych analiz wynika, że przewody opróżniające powinny mieć zbieżność ku dołowi rzędu $1,5 \div 2$ %.



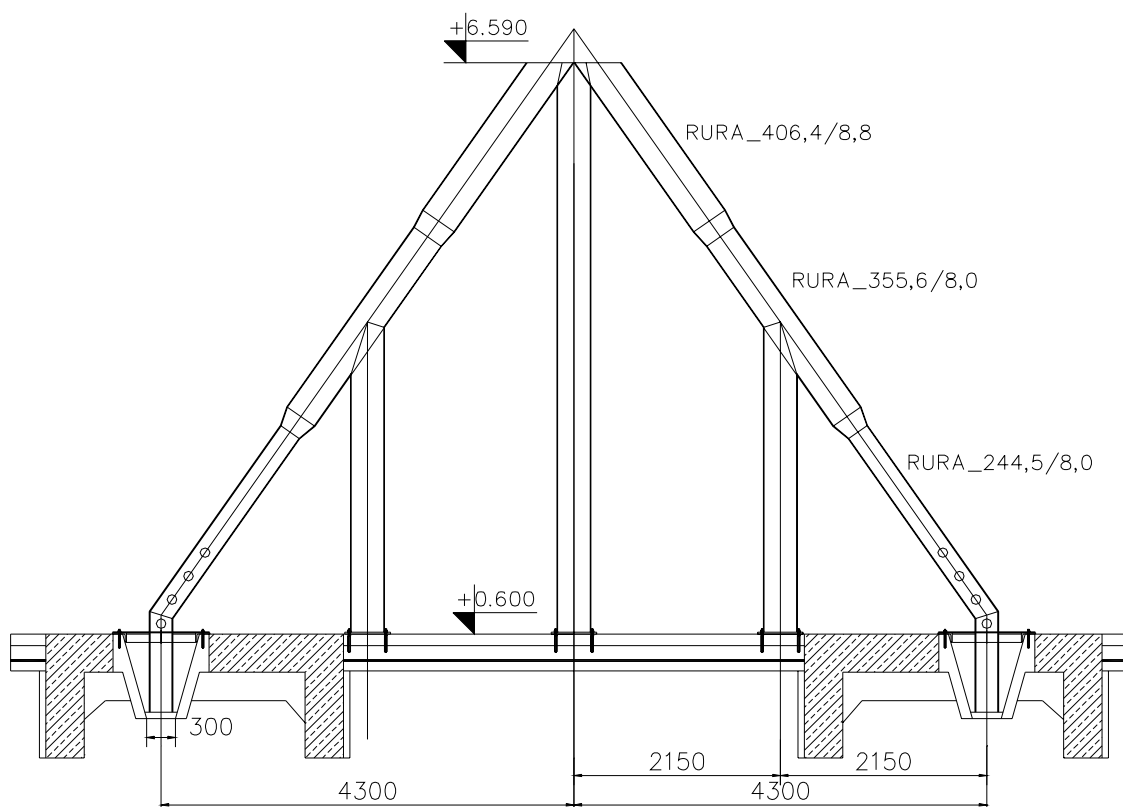
Rys. 9.1 Rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia do opróżniania silosów – wariant I

Dolny odcinek przewodu z rury $244,5/8$ posiada okrągłe otwory perforacyjne średnicy 100 mm, umieszczone w osi rury (jak na rys. 9.1), w rozstawie min. 200 mm, mierzonym w świetle. Górny wlot przewodów powinien posiadać jak największy przekrój, dlatego przewiduje się ścięcie górnych końców płaszczyzną poziomą.

Rozwiązanie zapewnia wypełnienie dolnych odcinków przewodu nawet przy dużym wydatku opróżniania, a umieszczone w nich otwory pozwalają na zminimalizowanie stref martwych, pozostających w komorze.

Nie mniej ważne jest poinstruowanie obsługi silosu w zakresie kolejności otwierania otworów wysypowych. W pierwszej kolejności otwiera się otwory pod przewodami ukośnymi, a gdy ziarno przestanie płynąć, wówczas można otworzyć kolejne, począwszy od tych najbliższych środka komory.

Drugim wariantem urządzenia, opierającym się na podobnych założeniach jest rozwiązanie z przewodami o zmiennej średnicy (rys. 9.2). Górny odcinek z rury 406,4/8,8 zwęża się przechodząc w rurę 355,6/8,0, a dolny średnicy 244,5/8,0 posiada otwory perforacyjne rozmieszczone jak w wariancie I.



Rys. 9.2 Rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia do opróżniania silosów – wariant II

Skokowa zbieżność średnic ku dołowi zapewnia wypełnienie ziarnem perforowanego dolnego odcinka przewodu.

Dodatkowym usztywnieniem konstrukcji są stalowe zastrzały podpierające górne wierzchołki rur w kierunku prostopadłym do płaszczyzny przewodów opróżniających, stężone z głównymi rurami pionowymi w połowie wysokości. Zastrzały i stężenia zaleca się również wykonać z rur, np. 244,5/8,0 mm.

Podobnie jak we wcześniejszych rozwiązaniach (rys. 2.6) należy przewidzieć podział urządzenia na elementy wysyłkowe, gabarytami odpowiadające otworowi technologicznemu w ścianie komory (1x1 m). Wszystkie połączenia elementów przewiduje się wykonać jako spawane.

Projektując podobne urządzenia należy pamiętać o tym, że parametry geometryczne dobierane są ściśle dla konkretnych rozwiązań i niemożliwa jest ich ekstrapolacja na inne obiekty, np. komory o innej geometrii. Zasadniczo przyjęte rozwiązania (rys. 9.1 i 9.2) spełniają swoją rolę poprawnie tylko w komorach typowych średnicy 19 m na rzepak, omówionych w rozdziale 2 niniejszej pracy. Stosowanie ich w innych silosach wymaga zrealizowania nowego, pełnego programu badawczego, podobnego w założeniach do omówionego w pracy.

10. Zakończenie, kierunki dalszych badań i wnioski końcowe

Przedstawiona praca ma charakter doświadczalny z elementami symulacji numerycznych. Celem pracy była próba wyznaczenia wpływu parametrów geometrycznych przewodów odciążających na obraz przepływu i obciążenia w silosie. Szczególną uwagę poświęcono zastosowaniu przewodów z rurami skośnymi montowanymi w komorach dużych średnic, które dotychczas nie były dostatecznie przebadane.

Oprócz wyjaśnienia zjawisk występujących podczas opróżniania komór silosów przy pomocy takich urządzeń skupiono się na wyznaczeniu obciążeń działających na przewody a także określono optymalne położenie, wielkość i kształt otworów perforacyjnych gwarantujących prawidłową ich pracę. Badania zmierzały w kierunku ustalenia rozkładu i wartości obciążeń działających na same przewody jako elementy pograżone w ośrodku sypkim oraz naporów działających na ściany i dno. Zasadniczą częścią badań modelowych była rejestracja naporów, odkształceń i obrazu przepływu oraz pomiar wydatku. Obrazy przepływu i deformacji uzyskane dzięki zastosowaniu przezroczystej ściany modelu zostały zarejestrowane w formie cyfrowej. Badania zasadnicze zostały poprzedzone badaniami cech fizyko-mechanicznych i granulometrycznych materiału sypkiego użytego do badań (rzepaku) i materiałów konstrukcyjnych modelu.

Badania doświadczalne wykonane na modelu zostały następnie zweryfikowane przez pomiary w skali naturalnej na obiekcie wyposażonym w oryginalną konstrukcję odciążającą nowego typu. Zasadniczą częścią badań weryfikacyjnych był pomiar naporów i obciążeń działających na konstrukcję odciążającą.

W końcowej części pracy zaprezentowano numeryczną symulację przepływu wykonaną przy użyciu kinematycznego asynchronicznego automatu komórkowego. Wykonano serię numerycznych symulacji przepływu materiału sypkiego w komorze bez wstawek i wyposażonej w przewody odciążające. Wykorzystano probabilistyczny algorytm iteracyjny, w którym stosuje się metodę przeszukiwania obszaru przepływu w poszukiwaniu pustek, z regułami migracji wykorzystującymi wagi prawdopodobieństwa. Zagadnienie modelowano w trójosiowym stanie odkształcenia.

Osiągnięcie celu, jakim było określenie optymalnych parametrów geometrycznych niskich przewodów odciążających i wyznaczenie charakteru, rozkładów i wartości obciążeń działających na nie, możliwe było dzięki wykorzystaniu pomiarów naporu działającego na

ściany i przewody, obserwacji przepływu i innych zjawisk towarzyszących opróżnianiu silosów.

Szczegółowe wnioski wynikające z interpretacji otrzymanych wyników przedstawiono w poszczególnych rozdziałach.

Wyniki tych badań potwierdzają pierwszą tezę, że urządzenia odciążające o małej wysokości, tzw. króćce zmniejszają przyrost naporu poziomego podczas opróżniania tylko w ograniczonym paśmie wysokości komory. Z analizy wyników pomiarów wynika, że wartości naporów na ściany w komorze wyposażonej w niskie urządzenie odciążające są zmniejszone względem komory opróżnianej tradycyjnie tylko w dolnym paśmie komory (do wysokości odpowiadającej w przybliżeniu wysokości króćca). Wartość tej redukcji waha się w zakresie 20 – 50 % (patrz rysunki 5.51 – 5.54). Dla wyższych partii komory otrzymywano w pewnych warunkach wzrost wartości naporów (maksymalnie o 25 % względem tradycyjnego opróżniania). Występuje tu zatem swoiste przegrupowanie rozkładu naporów z pasma niższego do wyższego. Należy zaznaczyć, że wzrost naporu nie występował przy opróżnianiu urządzeniem z optymalnie dobranymi parametrami, a tylko przy urządzeniach z podciąganiem.

Również w pełni została potwierdzona teza druga, w której twierdzono, że optymalne parametry przewodów zapewniają poprawne ich działanie tylko w wąskim zakresie geometrii komory. Stwierdzono podczas badań, że średnica otworu perforacyjnego dobrana dla jednego typu przewodu jako optymalna, nie jest optymalna dla przewodu innej średnicy (patrz punkt 5.9.2 i 5.9.4). Nie można zatem stosować identycznej perforacji dla mniejszych i większych średnic rur, a co stąd wynika również mniejszych i większych komór.

Teza trzecia, w której twierdzono, że wydatek opróżniania komory silosu wyposażonej w urządzenie redukujące zależy od powierzchni otworów perforacyjnych również została potwierdzona podczas badań. Stwierdzono, że istnieje graniczna wartość powierzchni otworów perforacyjnych, powyżej której urządzenie jest nieskuteczne, ponieważ występuje nieprawidłowy przepływ materiału sypkiego.

Dalszy rozwój przedstawionych w pracy metod badań doświadczalnych i rodzajów analiz numerycznych pozwoli na uściślenie wyników i umożliwi rozszerzenie zakresu analiz. Wymaga to szczegółowych prac teoretycznych i doświadczalnych zwłaszcza w zakresie przepływów. Przewiduje się, że dalsze badania modelowe silosów wyposażonych w przewody odciążające będą wykonywane w modelach przestrzennych stanowiących wierną kopię obiektu w małej skali. Dzięki zastosowaniu markerów radiowych możliwe będzie

uzyskanie niezaburzonego, trójwymiarowego obrazu przepływu, co pozwoli na dokładną analizę ruchu cząstek w sąsiedztwie urządzeń odciążających.

Zastosowanie techniki PIV (ang. *particle image velocimetry*) umożliwi dokładną analizę obrazu przepływu materiału sypkiego. Metoda ta, korzystająca z komputerowej analizy sekwencji obrazów cyfrowych pozwala na dokładne wyznaczenie profilu prędkości przepływu w obserwowanym miejscu [11, 44].

Niezbędne jest też kontynuowanie symulacji numerycznych przepływów przy użyciu kinematycznego, probabilistycznego automatu komórkowego, w kierunku określenia optymalnych wag prawdopodobieństwa, dających wyniki zweryfikowane doświadczalnie.

Zagadnienie stanu naprężenia w przewodach odciążających, będące odrębnym zagadnieniem, powinno być rozwiązywane przy użyciu metody elementów skończonych z uwzględnieniem składowej naporu normalnej i stycznej do ścianki przewodu, w oparciu o stosowane w literaturze modele teoretyczne ośrodka rozdrobnionego.

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski końcowe:

1. Opróżnianie komory silosu przy użyciu przewodów odciążających powoduje redukcję naporu w dolnych strefach komory. Maksymalna redukcja osiągnięta w badaniach modelowych wyniosła 52 %.
2. Zasadniczy wpływ na wartości współczynnika redukcji ma rodzaj zasypywania komory.) Największe wartości współczynnika redukcji daje zasyp centralny w kierunku środka komory. Zasypywanie mimośrodowe skutkuje minimalną redukcją naporu lub jego wzrostem.
3. Źle zaprojektowane przewody, posiadające np. zbyt duże lub nieprawidłowo usytuowane otwory perforacyjne, powodują wprowadzenie w ruch prawie całej masy znajdującej się w komorze, co jest sprzeczne z ideą ich działania.
4. Najbardziej optymalnym otworem perforacyjnym jest otwór umieszczony w osi przewodu o średnicy równej połowie średnicy rury. Stosowanie większych średnic skutkuje podciąganiem materiału ze stref nieruchomych, a mniejsze średnice nie zapewniają odpowiedniego wydatku w drugiej fazie opróżniania.
5. Istnieje pewna krytyczna wielkość otworu wysypowego, po przekroczeniu której przepływ w przewodzie przechodzi w burzliwy, odkrywając otwory perforacyjne, czego skutkiem jest intensywne podciąganie materiału z dolnych stref komory.
6. Przepływ w komorze wyposażonej w rurowe urządzenie odciążające ma charakter quasistatyczny, natomiast przepływ w przewodzie ma wyraźne cechy dynamiczne z oscylacjami.

7. Obciążenia ukośnych ramion przewodów są największe w początkowym okresie opróżniania, a w późniejszym okresie obniżają się i utrzymują na stałym poziomie.
8. Wykresy bezwymiarowych współczynników naporu mają podobny do siebie przebieg dla modelu i obiektu naturalnego. Kryteria podobieństwa modelowego zostały zatem zachowane.
9. Probabilistyczny automat komórkowy jest dobrym narzędziem do symulacji przepływu w osiowosymetrycznych komorach z elementami pograżonymi w materiale sypkim. Dzięki obrazom, rejestrowanym w wybranych iteracjach, możliwa jest analiza deformacji poruszających się warstw materiału sypkiego.
10. Obrazy przepływu wykonane w automacie komórkowym odbiegają od wyników eksperymentów doświadczalnych. Dotyczy to w szczególności kształtu górnej swobodnej powierzchni materiału i zachowania się materiału w pobliżu otworów perforacyjnych w przewodach. Górna powierzchnia w symulacjach dwuramiennych przewodów pozostaje płaska, co jest niezgodne z obserwacjami na modelu.
11. Z uwagi na czysto kinetyczny charakter automatu komórkowego, wykorzystanego w obliczeniach, niemożliwe było wychwycenie zjawisk dynamicznych, towarzyszącym przepływom. Nie można zatem korzystając z tego rodzaju narzędzia określić rozkładu, wartości i charakteru obciążeń w ośrodku sypkim.

Literatura

- 1 Baxter G. W., Behringer R. P., Cellular automata models for the flow of granular materials, *Physica D*, vol. 51 (1991) 465
- 2 Baxter G. W., Behringer R. P., Cellular automata models of granular flow, *Physical Review A*, vol. 42 (1990) 1018
- 3 Beverloo W. A., Leniger H.A., Van de Velde J.: *Chemical Engineering Science*, 15 (1961), s. 260-269.
- 4 Borcz A., *Silosy w przemyśle materiałów wiążących*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1987.
- 5 Désérable D., A versatile two-dimensional cellular automata network for granular flow, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 62 (2002) 1414
- 6 Diamountene K., Kamiński M., Maj M., Napór doświadczalny rzepaku w silosach w skali naturalnej, X Konferencja Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 1995.
- 7 Dmitrewski J., *Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych*, T.3, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1978.
- 8 Drescher A., *Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach*, PWN, Warszawa – Poznań, 1983.
- 9 Drescher A., On the criteria for mass flow in hoppers, *Powder Technology*, No. 73 (1992), s. 251-260.
- 10 Elaskar S. A., Godoy L. A., An application of non-newtonian fluid mechanics to granular flow using a critical state concept, *Powder handling & processing*, Vol. 10, No. 3, 1998, s. 239-244.
- 11 Ferrari G., Poletto M., The particle velocity field inside a two-dimensional aerated hopper, *Powder Technology*, 123 (2002), s. 242-253.
- 12 Firewicz H., Cykl 6-ciu prac pod wspólnym tytułem: Kinetik des Schwerkraft-Auslaufs Körnigen Gutes aus einem Bunker, *Aufbereitungs-Technik*; 25 (1984) s. 209-214, 25 (1985) s. 130-135, 27 (1986) s. 157-166, 29 (1988) s. 61-70, 31 (1990) s. 71-88, 34 (1993) s. 269-272.
- 13 Goodwill D. J., Craig D. A., Cabrejos F., Ore pass design for reliable flow, *Bulk Solids Handling*, Vol. 19, No. 1, 1999, s. 13-21.
- 14 Haff P. K., Grain flow as fluid – mechanical phenomenon, *Journal of Fluid mechanics*, No 134, 1983, s. 401-430.
- 15 Hall P. B., A 2,500 metric t/h circular storage reclaim system, *Bulk Solids Handling*, Vol. 5, No. 1, 1985, s. 173-177.
- 16 Janssen H. A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen, *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* (1895), s. 1045-1049

- 17 Jenike A.W., Storage and flow of solids, Bulletin of the University of Utah, Salt Lake City, 1964.
- 18 Jöhnk H., Reduzierung von Erschütterungen beim Abzug aus Klinkersilos, Zement-Kalk-Gips, Vol. 38, No. 11, 1985, s. 657-659.
- 19 Kamiński M., Antonowicz R., Badania naporu w cylindrycznym silosie o ścianach podatnych, XI Konf. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Świeradów Zdrój 2000, s. 81-86.
- 20 Kamiński M., Antonowicz R., Badania przepływu materiału sypkiego w silosach wyposażonych w rurowe urządzenia odciążające, XII Konf. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 2003, s. 97-104.
- 21 Kamiński M., Antonowicz R., The flow of rape seed in a silo equipped with a discharge device, Task Quarterly, Scientific Bulletin of Academic Computer Centre in Gdansk, vol. 7 (2003), s. 549-569.
- 22 Kamiński M., Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- 23 Kamiński M., Kmita A., Maj M., Wzmocnienie silosów żelbetowych na rzepak, X Konferencja Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 1995.
- 24 Kamiński M., Łagnowski J., Suwalski J., Zubrzycki M., Zastosowanie urządzeń redukujących przyrost naporu w silosie dużej średnicy, Przegląd Budowlany, Nr 1, 1984
- 25 Kamiński M., Zubrzycki M., Badania sił działających na przewody odciążające zawieszane w komorach silosów, XXV Konferencja Naukowa Komitetu ILiW PAN i Komitetu nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1979, s. 189-195.
- 26 Kamiński M., Zubrzycki M., Badania wpływu sposobów opróżniania na napór poziomy w cylindrycznych komorach żelbetowych silosów na zboże, Praca doktorska, Komunikat Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr I-2/K-38/77, Wrocław 1977.
- 27 Kamiński M., Zubrzycki M., Reduzieren des dynamischen Horizontaldruckes in Getreidesilos, Bauingenieur, No. 60, 1985, s. 313-318.
- 28 Kamiński M., Zubrzycki M., Testing of discharging pipes in silos in natural scale, In Recent developments in the field of constructions of silos, Wrocław, 1983.
- 29 Kamiński M., Zubrzycki M., Wytyczne projektowania przewodów redukujących napór poziomy zboża w silosach, Inżynieria i Budownictwo, Nr 1, 1981, s. 35-38.
- 30 Kamiński M., Zubrzycki M., Żelbetowe silosy na zboże, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985.
- 31 Khelil A., Roth J.C., Gravitational flow behaviour of granular materials, European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol. 13, No 1, 1994, s. 57-72.
- 32 Klimek A., Badania redukcji parcia materiału sypkiego w silosie o ścianach podatnych, Praca doktorska, Raport serii PRE, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- 33 Kobielałak S., Przyrządy i metodyka pomiaru parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.

- 34 Kóta B., Operational tests of discharge tubes with models, *Powder Handling & Processing*, Vol. 8, No. 1, 1996
- 35 Kozicki J., Niedostatkiewicz M., Zastosowanie automatu komórkowego do przepływu materiałów sypkich w silosach, XII Konf. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 2003, 115
- 36 Kozicki J., Tejchman J., Application of a cellular automata model to granular flow, *Task Quarterly, Scientific Bulletin of Academic Computer Centre in Gdansk*, vol. 6 (2002) s. 429
- 37 Kozicki J., Tejchman J., *Int. Journal of Storing, Handling and Processing Powder*, vol. 13 (3) 267
- 38 Kvapil R., *Teorie der Schüttgutbewegung – Auslaufverhalten von Schüttgütern aus Bunkern*, VEB Verlag Technik, Berlin 1959.
- 39 Malczewski J., *Mechanika materiałów sypkich. Operacje jednostkowe*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- 40 Malczewski J., Piekarski M., *Transport pędu, energii i masy*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984.
- 41 Martinez J., Masson S., Désérable D., Flow patterns and velocity profiles during silo discharge simulation with a lattice grain model, in *Proceedings of the Symposium on Storage and Flow of particulate solids, Partec 95, Nürnberg (1995)* 367.
- 42 McLean A. G., The design of silo side discharge outlets for safe and reliable operation, *Bulk Solids Handling*, Vol. 5, No 1, 1985, s. 185-190.
- 43 McLean A.G., Moore B.A., Rill tower design, *Bulk Solids Handling*, Vol. 5, No. 2, 1985, s. 339-344.
- 44 Medina A., Andrade J., Córdova J.A., Treviño C., Gravity induced granular flow measurements in a 2D silo with a lateral bottom exit, *Physics Letters A*, 273 (2000), s. 109-116.
- 45 Müller L., *Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli*, PWN, Warszawa 1983.
- 46 Nedderman R. M., Laohakul C., The thickness of the shear zone of flowing granular materials, *Powder Technology*, No. 73 (1992), s. 91-100.
- 47 Nedderman R. M., Tüzün U., Savage S. B., Housby G. T., The flow of granular materials - part I, *Chemical Engineering Science*, Vol. 37, No. 11, 1982, s. 1597-1609.
- 48 Nedderman R. M., Tüzün U., Savage S. B., Hulsby G. T.: The Flow of Granular Materials. Discharge Rates from Hoppers, *Chemical Engineering Science*, 37 (1982), s. 1597-1609
- 49 Niedostatkiewicz M., *Efekty dynamiczne w silosach*, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2002.
- 50 Ooi J. Y., Chen J. F., Lohres R.A., Rotter J. M., Prediction of static wall pressures in coal silos, *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 2, 1996, s. 109-116.

- 51 Ooi J. Y., Chen J. F., Rotter J. M., Measurement of solids flow patterns in a gypsum silo, *Powder Technology*, No. 99 (1998), s. 272-284.
- 52 Ooms M., Roberts A. W., The reduction and control of flow pressures in cracked grain silos, *Bulk Solids handling*, Vol. 5, No. 3, 1985, s. 1009-1016.
- 53 Ooms M., Roberts, A.W., The reduction and control of flow pressures during discharge from grain silos with concentric, eccentric and multiple outlets, *Proceedings of 10th Anniversary Powder & Bulk Solids Conference*, Chicago, U.S.A., 1985
- 54 Peter J., Lippold D., Baukonstruktion eines Grosraumsilos für Flugasche, *Zement-Kalk-Gips*, Vol. 38, 1985, s. 49-51.
- 55 Pieper K., Martens P., Nothdurft K., Silolasten, *Aufbereitungs-Technik*, Nr 11, 1975.
- 56 Reimbert M.L., Reimbert A.M., *Silos-theory and practice*, Lavoisier Publishing Inc., New York, 1987.
- 57 Reimbert M.L., Reimbert A.M., *Silosy-teoria i praktyka*, Arkady, Warszawa 1959.
- 58 Ries H. B., *Mischtechnik und Mischgeräte*, 2 Teil, *Aufbereitungs-Technik*, Nr 2, 1979, s. 78-98.
- 59 Roberts A. W., 100 years of Janssen, *Bulk Solids Handling*, Vol. 15, No. 3, 1995, s. 369-383.
- 60 Rybjański M., *Badania kinematyki przepływu materiałów sypkich w zbiornikach*, Raport serii SPR I02/87/S-015, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1987.
- 61 Rybjański M., Kokott P., *Przepływ materiałów sypkich w modelu zbiornika*, Konferencja Naukowo-Techniczna Żelbetowe i sprężone zbiorniki, Wrocław-Szklarska Poręba, 1992.
- 62 Rybjański M., *Pomiary obciążeń sond do pomiaru temperatur materiałów sypkich w silosach*, Raport serii SPR I02/89/S-032, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1989.
- 63 Rybjański M., Szechiński M., *Analiza pracy belek napowietrzających w komorach silosów zbożowych*, Konferencja Naukowo-Techniczna Żelbetowe i sprężone zbiorniki, Wrocław-Szklarska Poręba, 1992.
- 64 Safarian S.S., Harris E.C., Loads for design of stacking tubes for granular materials, *Bulk Solids Handling*, Vol. 5, No. 2, 1985, s. 349-356.
- 65 Safarian S.S., Harris E.C., Loads for design of stacking tubes for granular materials, Part II, *Bulk Solids Handling*, Vol. 5, No. 2, 1985, s. 845-857.
- 66 Schulze D., Schwedes J., Leonhardt C., Kossert J., Schüttguttechnische Anlegung eines Silos zur Lagerung von 10.000 t Schwefel, *Schüttgut* Vol. 3, no. 3, 1997, s. 299-305.
- 67 Schulze D., Schwedes J., Tests on the Application of discharge tube, *Bulk Solids Handling*, Vol. 12, No. 1, 1992, s. 33-39.
- 68 Schulze D., *Silos – design variants and special types*, *Bulk Solids Handling*, Vol. 16, No. 2, 1996, s. 225-232.

- 69 Schwedes J., Testers for measuring the bulk properties of particulate solids, International Symposium Proceedings, The reliable flow of particulate solids, Porsgrunn, Norway, 1999, s. 3-40.
- 70 Shalouf F.F., Influence on geometric characteristics of discharge tubes fixed to internal wall surface on pressures in grain silo, Praca doktorska, Raport serii PRE, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- 71 Stachurski W., Łapko A., Badania sił obciążających elementy pionowe pogrążone w ośrodku sypkim komór silosów na zboże, XXV Jubileuszowa Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZiTb, Wrocław-Krynica, 1979.
- 72 Stachurski W., Łapko A., Określenie sił podłużnych występujących w rurach perforowanych w komorach silosowych, Inżynieria i Budownictwo, Nr 3, 1979, s. 99-102.
- 73 Stange K., Pneumech silo. Solution for large-scale and long-term storage of fly ash, Bulk Solids Handling, Vol. 5, No 2, 1985, s. 407-429.
- 74 Verghese T. M., Nedderman R. M., The discharge of fine sands from conical hoppers, Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 19 (1995), s. 3143-3153.
- 75 Więckowski Z., Modelling of silo discharge and filling problems by the material point method, Task Quarterly, vol. 7 (2003) 701.
- 76 Więckowski Z., Modelowanie procesów opróżniania i napełniania zbiornika na materiał sypki, XII Konf. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 2003, 223.
- 77 Wilms H., Homogenisieren von Schüttgütern in Mischsilos, Chemische Ingenieure Technik, Vol. 58, No. 11, 1986, s. 867-875.
- 78 Wirska E. E., Badania wpływu podatności ścian na rozkład naporu materiału sypkiego w silosie, Praca doktorska, Raport serii PRE, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- 79 Yalamanchili R. C., Gudhe R., Rajagopal K. R., Flow of granular materials in a vertical channel under the action of gravity, Powder Technology, No. 81 (1994), s. 65-73.
- 80 Zbiorniki materiałów sypkich, praca zbiorowa, Budownictwo i Architektura, Warszawa, 1955.

Spis rysunków

2.1	Widok z góry (a) i z dołu (b) baterii komór średnicy 19 m ustawionych w dwóch rzędach (widoczna galeria nadkomorowa i wieża manipulacyjna)	2
2.2	Komorza silosowa średnicy 19 m – przekrój pionowy i rzut dna	3
2.3	Kolejne fazy opróżniania komory przy użyciu przewodu odciążającego	4
2.4	Króciec odciążający w komorze średnicy 19 m i kolejność otwierania otworów wysypowych	5
2.5	Fazy przepływu w komorze wyposażonej w króciec odciążający	5
2.6	Zmodyfikowane urządzenie odciążające do komory średnicy 19 m	5
2.7	Model do badań rurowych urządzeń odciążających	6
3.1	Idea opróżniania komory przez przewód perforowany Reimbertów [56, 57]	8
3.2	Przewód zajmujący całą wysokość komory zastosowany w badaniach Kamińskiego i Zubrzyckiego [25-30]	9
3.3	Rura zajmująca pełną wysokość komory z bocznym ramieniem wysypowym [30].	10
3.4	Króciec odciążający z ramieniem bocznym (a) i współczynniki dynamiczne(b) według badań Kamińskiego i Zubrzyckiego [26]	10
3.5	Króciec odciążający do komór o proporcjach $H \leq 10r_h$	11
3.6	Wyniki badań króćca odciążającego do komór o proporcjach $H \leq 10r_h$	11
3.7	Wyniki badań przepływu i naporów według Oomsa i Robertsa w komorze wyposażonej w króciec odciążający [52, 53]	13
3.8	Wyniki badań naporów Oomsa i Robertsa w komorze wyposażonej w króciec odciążający z ramieniem bocznym	14
3.9	Wartości współczynnika dynamicznego według badań Shaloufa [70]; h_t – wysokość rynny rozładowniczej, krzywa ze znacznikami w kształcie rombu odpowiada opróżnianiu bez rynny	15
3.10	Siły obciążające przewód odciążający w funkcji poziomu zasypu [71, 72]	17
3.11	Zmienność sił obciążających przewód w funkcji ugięcia zawiesia [71]	17
3.12	Porównanie sił działających na przewód z wartościami wg Reimbertów i Foss Electric [72]	18
3.13	Wpływ przemieszczeń przewodu odciążającego na wartość sił pionowych [30], badania modelowe (a), badania w skali naturalnej (b)	19
3.14	Usytuowanie i przekrój belek napowietrzających	20
3.15	Zalecany układ obciążeń działających na element napowietrzający w przekroju poprzecznym (a) i podłużnym (b)	20
3.16	Zalecane przekroje rur rozładowniczych według McLean'a [43]	22
3.17	Zmodyfikowana wieża rozładownicza zapewniająca duży wydatek [42]	23
3.18	Model badawczy Rolewicza ze zsuwnią [4]	24
3.19	Wyniki badań modelowych Rolewicza [4]	25
3.20	Schemat wyznaczania obciążeń w komorze wyposażonej w króciec [53]	26
3.21	Napór i siły działające na króciec odciążający według badań Robertsa [53]	26
3.22	Komorza typu Pneumech Silo na popioły lotne wyposażona w wieżę opróżniającą [64]	27
3.23	Sytuacja obliczeniowa do projektowania wieży opróżniającej [63, 64]	28
3.24	Stanowisko Borcza do pomiaru wydatku opróżniania [4]	30
3.25	Obrazy przepływu w modelu Borcza [4]	30

3.26	Ilość wypływającego ziarna w czasie dla różnych materiałów i szerokości szczeliny według badań Borcza [4]	31
3.27	Aproksymacja wyników badań doświadczalnych przy pomocy zależności (3.31)	32
3.28	Komora silosowa zasypana do wysokości H	32
3.29	Wykres zależności wydatku W od średnicy otworu wysypowego D_0 według Beverloo [3]	33
3.30	Model Schwedesa do określania wydatku z komory wyposażonej w rurowe urządzenie odciążające [67]	36
3.31	Układ współrzędnych w analizie Khelila i Rotha [31]	37
3.32	Profile prędkości przepływu płaskiego według [31]	39
3.33	Model z przegrodami do badań przepływów [34]	39
3.34	Opróżnianie komory z przegrodą przez otwór środkowy [34]	40
3.35	Równowaga elementarnego odcinka materiału [34]	40
3.36	Równowaga sił w modelu dwóch klinów [34]	42
3.37	Zobrazowanie hipotezy naporu biernego i czynnego [34]	42
3.38	Wyniki badań Rybiańskiego [60]; krzywe rozkładu częstości wartości wydatku opróżniania (a), kształt wtórnego rdzenia przepływu dla rzepaku (b)	43
3.39	Rozkład czasu wypłynięcia markera na obwodzie [51]	44
3.40	Profil przepływu – wypływ swobodny według badań Więckowskiego [76] ...	45
3.41	Profil przepływu – wypływ regulowany według badań Więckowskiego [76]	45
3.42	Zmiany naprężeń w obszarze nad otworem wysypowym [38].....	46
3.43	Siły działające na materiał sypki w nachylonym korycie [39]	47
3.44	Układ rur spadowych (a) i przepływ szybki w krótkim kolanie (b) [7]	51
3.45	Wpływ wydłużenia kolana rurowego na charakter przepływu (a) i przepływ całym przekrojem rury (b) [7]	52
3.46	Wykres zmiany wydatku rzepaku w korycie w zależności od kąta środkowego kolana	52
3.47	Zwężenie strugi materiału sypkiego przy przepływie w długim nachylonym rurociągu	53
3.48	Wykres zmiany wydatku w zależności od długości prostoliniowego odcinka wylotowego	53
3.49	Elipsoida obrotowa według badań Kvapila [38]	54
3.50	Wykres współczynnika λ w funkcji współczynnika tarcia wewnętrznego według badań Kvapila [38]	56
3.51	Geometria kanału z przyjętymi oznaczeniami według pracy [79]	57
3.52	Profil prędkości w pionowym kanale dla różnych wartości G [79].....	59
5.1	Widok modelu komory w etapie I	63
5.2	Komora silosowa średnicy 19 m, będąca pierwowzorem badań modelowych	64
5.3	Aproksymacja przekroju poprzecznego komory modelowej	64
5.4	Przewidywany napór w komorze naturalnych rozmiarów oraz w silosie modelowym	65
5.5	Widok stanowiska pomiarowego do badań urządzeń odciążających	66
5.6	Pobocznica ściany silosu modelowego w rozwinięciu	67
5.7	Dno modelu z rozmieszczeniem otworów pod czujniki	67
5.8	Widok i charakterystyka czujnika tensometrycznego nr 4 z gniazdem	68
5.9	Widok i charakterystyka dwustronnego czujnika tensometrycznego nr 0_2 ..	68
5.10	Widok i charakterystyka dwustronnej sondy pogrązalnej nr 2	69
5.11	Widok i charakterystyka kalibracji czujnika naporu stycznego nr 2	69

5.12	Pomiaru średnicy ziaren dokonano przez analizę obrazu cyfrowego	71
5.13	Aparat bezpośredniego ścinania użyty do określenia cech mechanicznych rzepaku: a) widok urządzenia, b) przekrój poprzeczny A–podstawa, B–pierzścień, C–pokrywka	71
5.14	Przebieg ścinania podczas badania kąta tarcia kontaktowego o pleksiglas	72
5.15	Wyniki pomiaru kąta tarcia o pleksiglas $\varphi_{ep} = 19,5^\circ$	73
5.16	Zrywanie próbki rury w maszynie wytrzymałościowej i wykres σ – ε	73
5.17	Przewody odciążające dwugałęziowe typu I (grubościenne) i typu II (cienkościenne) zastosowane w badaniach	77
5.18	Przewody odciążające jednogałęziowe typu III, IV i V zastosowane w badaniach	78
5.19	Schematyczny program zrealizowanych badań	78
5.20	Podstawowe sposoby napełniania komory modelowej (a) i stosowane dla jednoramiennych przewodów napełnianie mimośrodowe (b)	81
5.21	Wykres naporów w czasie napełniania i opróżniania centrycznego (opis w tekście)	82
5.22	Wykres naporów w czasie napełniania i opróżniania (opis w tekście)	83
5.23	Wykres naporów w czasie napełniania i opróżniania przez dwa otwory ($z/H=0,69$)	83
5.24	Współczynnik dynamiczny – model Ia_LP (rząd 0 i 45)	84
5.25	Współczynnik dynamiczny – model Ia_LP (rząd 90)	84
5.26	Współczynnik dynamiczny – model Ia_L I Ia_P (rząd 0 i 45)	85
5.27	Współczynnik dynamiczny – model Ia_L I Ia_P (rząd 90)	85
5.28	Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP (rząd 0 i 45)	85
5.29	Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP (rząd 90)	86
5.30	Współczynnik dynamiczny – model II_LP (rząd 0 i 45)	86
5.31	Współczynnik dynamiczny – model II_LP (rząd 90)	86
5.32	Współczynnik dynamiczny – model III (rząd 0 i 45)	87
5.33	Współczynnik dynamiczny – model III (rząd 90)	87
5.34	Współczynnik dynamiczny – model IV (rząd 0 i 45)	88
5.35	Współczynnik dynamiczny – model IV (rząd 90)	88
5.36	Współczynnik dynamiczny – model V (rząd 0 i 45)	88
5.37	Współczynnik dynamiczny – model V (rząd 90)	89
5.38	Współczynnik dynamiczny – model Ia_LP i 0_LP	89
5.39	Współczynnik dynamiczny – model Ia_L i Ia_LP	89
5.40	Współczynnik dynamiczny – model 0_P i Ia_LP_A2	90
5.41	Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP_A2 i Ib_LP_A1	90
5.42	Współczynnik dynamiczny – model Ib_LP_A3 i IIa_LP	90
5.43	Współczynnik dynamiczny – model IIc_LP i IIb_LP	91
5.44	Współczynnik dynamiczny – model IIe_LP i IIIa	91
5.45	Współczynnik dynamiczny – model IIIb i IIIc	91
5.46	Współczynnik dynamiczny – model 0_L(III)	92
5.47	Współczynnik dynamiczny – model IVa i IVb	92
5.48	Współczynnik dynamiczny – model IVc i 0_L(IV)	92
5.49	Współczynnik dynamiczny – model Va i Vb	93
5.50	Współczynnik dynamiczny – model Vc i 0_L(V)	93
5.51	Stopień redukcji naporu dynamicznego – model Ia	94
5.52	Stopień redukcji naporu dynamicznego – model Ib	94
5.53	Stopień redukcji naporu dynamicznego – model II i III	94
5.54	Stopień redukcji naporu dynamicznego – model IV i V	95

5.55	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_LP (rząd 0 i 45)	95
5.56	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_LP (rząd 90)	96
5.57	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_L i Ia_P (rząd 0 i 45)	96
5.58	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ia_L i Ia_P (rząd 90)	96
5.59	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ib_LP (rząd 0 i 45)	97
5.60	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model Ib_LP (rząd 90)	97
5.61	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model II_LP (rząd 0 i 45)	97
5.62	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model II_LP (rząd 90)	98
5.63	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model III (rząd 0 i 45)	98
5.64	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model III (rząd 90)	98
5.65	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model IV (rząd 0 i 45)	99
5.66	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model IV (rząd 90)	99
5.67	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model V (rząd 0 i 45)	99
5.68	Względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych – model V (rząd 90)	100
5.69	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model Ia_LP	101
5.70	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model Ia_L i Ia_P	101
5.71	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model Ib	101
5.72	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model II	102
5.73	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model III	102
5.74	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model IV	102
5.75	Współczynnik dynamiczny i względny czas pozostawania wartości ponadstatycznych na dno – model V ..	103
5.76	Kalibracja czujnika nr 3 w zakresie 10 kPa na rejestratorze analogowym, przy użyciu słupa wody; cyframi oznaczono ciśnienie w [Pa]· 10 ¹	105
5.77	Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model 0_L)	105
5.78	Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model Va)	106
5.79	Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model Vb)	106
5.80	Zarejestrowane ciągłe przebiegi naporu normalnego (model Vc)	107
5.81	Obrazy przepływu w komorze opróżnianej tradycyjnie	108
5.82	Obrazy przepływu w komorze z jednostronnym przewodem Vc	109

5.83	Obrazy przepływu w komorze opróżnianej jednostronnym przewodem typu IVc	110
5.84	Obrazy przepływu w komorze opróżnianej jednostronnym przewodem typu II	111
5.85	Idea pomiaru siły w podstawie rury	113
5.86	Zarejestrowane wartości siły pionowej w podstawie modelu IV	113
5.87	Osiadanie przewarstwień z gorczyicy w pobliżu perforacji	114
5.88	Otwory kwadratowe w rurze – zmienne położenie	114
5.89	Otwory okrągłe w rurze – zmienne położenie	115
5.90	Optymalne położenie perforacji w rurze okrągłej	116
5.91	Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wysypowego – model I	116
5.92	Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wysypowego – model III	117
5.93	Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wysypowego – model IV	117
5.94	Wydatek opróżniania Q_s w funkcji wielkości otworu wysypowego – model V	117
5.95	Opróżnianie przez lewe ramię urządzenia Ia – widoczny niesymetryczny kanał przepływu	119
5.96	Opróżnianie przez dwa otwory wysypowe – widoczna martwa strefa na granicy otworów	119
5.97	Obraz przepływu w komorze opróżnianej przez lewy otwór – widoczny zasięg kanału przepływu rozszerzający się w miarę postępu opróżniania	120
5.98	Fragment komory z widocznym wierzchołkiem przewodu odciążającego, opróżnianej dwoma otworami jednocześnie	120
5.99	Widok przedniej szyby po serii pomiarów – widoczne strefy o zróżnicowanym stopniu zmatowienia przez przemieszczające się ziarno	121
5.100	Widok opróżnionej komory wyposażonej w przewód typu IIf – widoczne strefy martwe, których objętość wynosi 6% objętości komory	121
5.101	Fazy przepływu w komorze wyposażonej w przewód typu IIf – widoczne osiadania warstw nad otworami	122
5.102	Komora z przewodem IIIc – całkowite otwarcie otworu wysypowego powoduje przejście przepływu w burzliwy	122
5.103	Kanał przepływu w modelu Vc – brak osiadań w przewarstwieniach gorczyicy dowodzi prawidłowo przyjętej średnicy perforacji (rys. lewy); całkowite otwarcie otworu wysypowego powoduje przejście w przepływ burzliwy (rys. prawy)	123
5.104	Zobrazowanie hipotezy wpływu ustawienia przewodu prostokątnego	124
6.1	Widok i charakterystyka czujnika magnetosprężystego Nr 90	125
6.2	Widok ukośnego odcinka przewodu odciążającego wyposażonego w czujniki naporu	126
6.3	Widok urządzenia odciążającego wyposażonego w przyrządy pomiarowe	126
6.4	Stanowisko pomiarowo-rejestrujące w tunelu podkomorowym (a) i przenośnik taśmowy z wietrzniakiem urządzenia aspirującego (b)	127
6.5	Numeracja czujników do pomiaru naporu, zamontowanych na zewnątrz (a) i w przewodzie odciążającym (b)	128
6.6	Wykresy naporu na czujniki umieszczone na zewnątrz rury w czasie początkowych 4 godzin opróżniania	129
6.7	Wykresy naporu na czujniki umieszczone na zewnątrz rury w czasie drugiego dnia opróżniania	130
6.8	Wykresy naporu na czujniki umieszczone na zewnątrz rury w czasie trzeciego dnia opróżniania	131

6.9	Wykresy naporu rejestrowane 4-krotnie w ciągu dnia	132
6.10	Wykresy naporu na czujniki umieszczone wewnątrz rury w czasie początkowych 4 godzin opróżniania	133
6.11	Wykresy naporu na czujniki umieszczone wewnątrz rury w czasie drugiego dnia opróżniania	133
6.12	Wykresy naporu na czujniki umieszczone wewnątrz rury w czasie trzeciego dnia opróżniania	134
6.13	Rozmieszczenie tensometrów w przekroju rury i wykres odkształceń przy założeniu $e_y = 0$	135
6.14	Siła podłużna N i mimośród siły e w kolumnie A w czasie opróżniania	135
6.15	Siła podłużna N i mimośród siły e w kolumnie B w czasie opróżniania	136
6.16	Siła podłużna N i mimośród siły e w kolumnie C w czasie opróżniania	136
6.17	Siła podłużna N i mimośród siły e w gałęzi D w czasie opróżniania	137
6.18	Numeracja węzłów zastosowana w obliczeniach MES	138
6.19	Siły podłużne w prętach ustroju od ciężaru własnego	138
6.20	Wydatek i poziom zasypu podczas opróżniania	140
6.21	Rozmieszczenie czujników do pomiaru temperatury	141
6.22	Wyniki pomiarów temperatury ziarna za pomocą sond	142
7.1	Porównanie naporów pomierzonych w badaniach modelowych i na obiekcie w skali naturalnej	144
8.1	Heksagonalna siatka z kierunkami głównymi i konwencją znakowania (a) i dwuelementowy opis stanu ziarna (b)	147
8.2	Prostokątna płaska siatka w modelu Kozickiego i Tejchmana [34]	149
8.3	Reguły migracji w płaskim modelu Kozickiego i Tejchmana [34]	149
8.4	Reguły migracji w modelu przestrzennym	149
8.5	Fragment tablicy używanej w automacie komórkowym ze zdefiniowaną ścianą komory	150
8.6	Fragment tablicy definiującej przewod z obustronnymi otworami	150
8.7	Konfiguracje wag prawdopodobieństwa przyjmowane w obliczeniach numerycznych	151
8.8	Przekroje pionowe przez komorę bez przewodów opróżnianą dwoma otworami (konfiguracja A)	151
8.9	Porównanie obrazów przepływu w tych samych iteracjach dla różnych konfiguracji wag (dużą literą oznaczono nazwę konfiguracji – według rysunku 8.7)	152
8.10	Kolejne obrazy przepływu w tych samych iteracjach dla różnych konfiguracji wag	153
8.11	Liczba cząstek pozostających w komorze podczas opróżniania	154
8.12	Wydatek podczas opróżniania dla różnych konfiguracji	154
8.13	Przekroje pionowe przez komorę z przewodami bez otworów (konfiguracja A)	155
8.14	Przekroje pionowe przez walcową komorę z króćcem centrującym przepływ	156
8.15	Przekroje pionowe przez komorę z kolumną rozładowniczą zajmującą całą wysokość komory	156
9.1	Rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia do opróżniania silosów – wariant I ...	158
9.2	Rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia do opróżniania silosów – wariant II ..	159

Spis tablic

3.1	Wyniki badań obciążeń kabli według Rybiańskiego [62]	21
3.2	Porównanie wartości wydatków z modeli teoretycznych z badaniami Niedostatkiewicza [49]	36
3.3	Najmniejsze wartości kąta nachylenia koryta β o przekroju prostokątnym dla różnych materiałów [39]	50
3.4	Wartości współczynnika lotności [39]	51
5.1	Parametry przewodów odciążających użytych w I etapie badań (oznaczenia jak na rys. 5.1.)	63
5.2	Kąt tarcia kontaktowego o próbkę ze szkła organicznego przy różnych naprężeniach konsolidujących	72
5.3	Zestawienie skal podstawowych parametrów modelu	77
5.4	Zestawienie zmiennych parametrów badanych przewodów odciążających	79
5.5	Obciążenie globalne ściany i dna	104
5.6	Zestawienie wyników z rejestratora analogowego	107
5.7	Zestawienie naporów działających na przewód	112
5.8	Wpływ kształtu, położenia i wielkości otworów perforacyjnych na wartość wydatku	115
5.9	Krytyczne powierzchnie otworów wysypowych	123
6.1	Zestawienie operacji dokonywanych podczas opróżniania	128
6.2	Porównanie wartości naporów po napełnieniu i maksymalnych w czasie opróżniania	129
6.3	Porównanie odczytów 3,75 i 15,75, oddzielonych 11-godzinną przerwą nocną	130
6.4	Porównanie odczytów 27,62 i 40,42, oddzielonych 11-godzinną przerwą nocną	131
6.5	Porównanie pomiarów naporu od zewnątrz z obliczeniami według Janssena i zależności (6.1)	132
6.6	Zestawienie sił podłużnych od ciężaru własnego obliczonych za pomocą MES i sił maksymalnych uzyskanych z badań na obiekcie, naprężenia w najbardziej wyężonym punkcie przekroju	139