

GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICICTWA W KATOWICACH



PRACA DOKTORSKA

SPOSÓB POPRAWY PRACY STOJAKA SEKCJI
OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ

Mgr inż. Janina Świątek

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Kazimierz STOIŃSKI

Promotor pomocniczy:
Dr inż. Sylwester RAJWA

Katowice, 2020 r.

Serdeczne podziękowania:

Dyrekcji Głównego Instytutu Górnictwa z Panem Prof. dr hab. inż. Stanisławem Pruskiem na czele oraz Radzie Naukowej, za stworzenie możliwości rozwoju naukowego.

Panu Prof. dr hab. inż. Kazimierzowi Stoińskiemu, Promotorowi oraz Panu dr inż. Sylwestrowi Rajwie, Promotorowi pomocniczemu, za nieocenioną pomoc, poświęcony czas oraz wsparcie naukowe w czasie prowadzenia badań i przygotowywania niniejszej pracy.

Podziękowania kieruję także do Zakładu Remontowo-Produkcyjnego w Bieruniu oraz Centrum Hydrauliki DOH w Bytomiu.

Dziękuję także wszystkim osobom którymi codziennie się otaczam, za nieustanne wsparcie i motywację do działania.

SPIS TREŚCI

WYKAZ PODSTAWOWYCH POJĘĆ I OZNACZEŃ	6
1. WPROWADZENIE	10
2. STAN ZAGADNIENIA.....	12
2.1. Dobór podporności sekcji do warunków geologiczno-górnich z wykorzystaniem wskaźnika nośności stropu „g”	14
2.2. Wyznaczanie stopnia dociążenia obudowy zmechanizowanej z wykorzystaniem współczynnika n_{iz}	19
2.3. Wyznaczenie obciążenia sekcji obudowy dla przypadku gwałtownego zaciśnięcia wyrobiska.....	21
2.4. Metoda oceny upodatkowanie wg GIG – wyznaczenie bezpiecznego zakresu pracy obudowy.....	23
2.5. Badania dodatkowe.....	26
2.6. Wnioski z przeglądu literatury.....	33
3. CEL I ZAKRES PRACY	34
4. ANALIZA AKTUALNIE STOSOWANYCH SEKCJI OBUDÓW ZMECHANIZOWANYCH	36
4.1. Przeciążenie sekcji obudowy zmechanizowanej.....	36
4.2. Parametry eksploatacyjne i techniczne aktualnie stosowanych obudów zmechanizowanych.....	37
5. PRZEDMIOT BADANIA.....	41
6. INWENTARYZACJA – SPIS USZKODZEŃ ELEMENTÓW UKŁADÓW STEROWANIA STOJAKÓW HYDRAULICZNYCH ZMECHANIZOWANYCH OBUDÓW ŚCIANOWYCH W WYNIKU WSTRZĄSÓW GÓROTWORU.....	46
6.1. Opis uszkodzeń elementów układów sterujących	46
7. ANALIZA PRZYPADKU USZKODZEŃ ELEMENTÓW UKŁADU STEROWANIA SEKCJI ZE STOJAKAMI O ŚREDNICY CYLINDRA I STOPNIA \varnothing 0,3 m	52
7.1. Opis warunków eksploatacyjnych	52
7.2. Przyczyny powstawania uszkodzeń.....	52
7.3. Zalecenia umożliwiające kontynuację eksploatacji w oparciu o przeprowadzone analizy i badania.....	62
8. ANALIZA PRZYPADKU SEKCJI ZE STOJAKAMI O ŚREDNICY I STOPNIA \varnothing 0,32 ORAZ \varnothing 0,37 m.....	64
8.1. Wprowadzone zmiany w układzie sterowania stojakiem oraz parametrów roboczych sekcji	66
8.2. Sprawdzenie doboru i upodatkowania dla wprowadzonych zmian (modernizacji).....	67
9. Badania modelowe przepływów w przyłączy stojakowym.....	70
9.1. Przygotowanie modelu	70
9.2. Analizy numeryczne przepływów	72

9.3. Podsumowanie przeprowadzonych analiz numerycznych.....	83
10. BADANIA OBCIĄŻONEGO DYNAMICZNIE MODELOWEGO STOJAKA	84
<i>10.1. Model stojaka przeznaczonego do badań dynamicznych z różnymi przyłączami i wyposażeniem.....</i>	<i>84</i>
<i>10.2. Badania udarem masy modelowego stojaka o średnicy \varnothing 0,32 m</i>	<i>88</i>
<i>10.3. Badania udarem masy modelowego stojaka o średnicy \varnothing 0,32 m z wykorzystaniem materiału wybuchowego.....</i>	<i>96</i>
11. MODERNIZACJA UKŁADU ZABEZPIEZAJĄCEGO SEKCJE ZE STOJAKAMI O ŚREDNICY I STOPNIA \varnothing 0,32 I \varnothing 0,37 m.....	104
12. KONCEPCJA BADAŃ MODELOWYCH STOJAKÓW O DUŻYCH ŚREDNICACH I STOPNIA	110
13. PODSUMOWANIE I PROPOZYCJE KOŃCOWE	117
LITERATURA	121
SPIS RYSUNKÓW.....	127
SPIS FOTOGRAFII.....	129
SPIS TABLIC.....	130

STRESZCZENIE

Wprowadzane w ostatnich latach do eksploatacji w kopalniach węgla kamiennego sekcje obudów zmechanizowanych o bardzo dużych podpornościach ze stojakami o średnicach I stopnia powyżej 0,30 m, związane jest z pogarszającymi się warunkami geologiczno-górnictwymi. Zwiększanie średnic stojaków i ich podporności stawia zwiększone wymagania dla hydrauliki sterującej stojakami i ich zabezpieczeń przed przeciążeniami. Pojawiają się nie spotykane dotychczas nadmierne uszkodzenia elementów hydrauliki, w skrajnych przypadkach prowadzące do utraty szczelności w układach zabezpieczających stojak i niekontrolowanych zsuwów sekcji. Skutkiem jest zwykle wstrzymanie wydobywania ze ścian. Warto zaznaczyć, że we wszystkich takich przypadkach dochowano wszelkich wymagań formalnych i technicznych przy wprowadzaniu sekcji do eksploatacji.

Przedmiotem niniejszej dysertacji jest poprawa pracy stojaka hydraulicznego w szczególności w drodze usprawnienia systemu jego sterowania.

Przeprowadzono w szerokim zakresie przegląd literatury związanej z tematyką rozprawy, a następnie opisano cztery charakterystyczne przypadki zastosowania obudów ze stojakami hydraulicznymi o dużych średnicach, w których pomimo dochowania wszelkich wymogów formalnych i technicznych wystąpiło zagrożenie bezpieczeństwa eksploatacji w ścianie. Wykorzystano dostępne metody obliczeniowe, badania modelowe oraz badania laboratoryjne co pozwoliło na realizację przyjętych założeń. W pierwszej kolejności opisano podjęte działania doraźne umożliwiające kontynuację eksploatacji, a w dalszej kolejności opisano badania poznawcze pozwalające na identyfikację przyczyn nadmiernych uszkodzeń elementów hydrauliki, jako następstw wstrząsów górotworu. Przedstawiono propozycje optymalizacji układów sterowania oraz parametrów technicznych analizowanych sekcji, które proponuje się wykonać podczas remontów pogwarancyjnych.

Zebrane doświadczenia wykorzystano również do przedstawienia założeń koncepcji oceny dynamiki sekcji i stojaków, z wykorzystaniem modeli obliczeniowych i walidacji wyników obliczeń, na podstawie badania udarem masy modeli fizycznych stojaków w pomniejszonej skali.

ABSTRAKT

Deteriorating mining and geological conditions in recent years have forced mining companies to use powered roof supports with very high load-bearing capacity equipped with hydraulic legs with diameter bigger than 0.30 m. Increasing the diameter of the leg and its support capacity means increased requirements to the hydraulic control system and its overload protection. In this supports the unusual excessive damage to hydraulic components occurs, in extreme cases leading to a loss of tightness in leg protection systems and uncontrolled slide-down. This usually stops the mining process. It should be noted, that in all such cases all regulatory and technical constrains concerning the support were met.

The subject of the work is to improve the operation of the hydraulic leg in particular by improving its control system.

The research consisted an extensive review of available papers that deal with this scope of interest. Next the author analysed four cases in which, in spite of meeting all regulatory and technical constrains, the safety of the mining process was hindered.

Available calculation methods, model tests and laboratory tests were applied to complete the research. The first step was to describe ad-hoc actions enabling the continuation of longwall operation. In following step the describe cognitive tests allowing the identification of the causes of excessive damage to the components of the hydraulic system were presented. The dissertation provides some optional solutions to optimize control systems and technical parameters that can be applied during the post-warranty overhaul and repairs.

The experience was also used to present the idea of evaluation of dynamics of supports and its legs, using calculation models and validation of research results based on mass impact tests of leg physical models in a reduced scale.

WYKAZ PODSTAWOWYCH POJĘĆ I OZNACZEŃ

Przeciążenie i jego skutki:

Przekroczenie chwilowych wartości obciążenia nominalnego, w odniesieniu do przyjętego współczynnika bezpieczeństwa, dla konstrukcji sekcji obudowy zmechanizowanej i jej elementów składowych, wskutek wystąpienia wstrząsu górotworu. Skutki to uszkodzenia elementów sekcji obudowy zmechanizowanej, utrata funkcjonalności oraz zagrożenie bezpieczeństwa pracy.

Upodatnienie:

Przystosowanie sekcji obudów zmechanizowanych do przejmowania obciążeń dynamicznych w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. Celem jest wyznaczenie bezpiecznego zakresu pracy obudowy zmechanizowanej oraz dobór zabezpieczeń dla danych warunków geologiczno-górnich, eksploatacyjnych i technicznych sekcji. Metoda upodatnienia stosowana w GIG jest metodą analityczną opartą o wybrane parametry górnicze (współczynnik dociążenia n_{tz} , wskaźnik nośności stropu „g”), eksploatacyjne oraz techniczne sekcji i jej zabezpieczeń.

Wskaźnik nośności stropu „g”

Wartość wskaźnika „g” jest zależna od jednostkowego nachylenia stropu z_{LI} w ścianie oraz od wartości nachylenia granicznego z_g , obliczana dla odcinaka o długości 1 m, licząc od ociosu ścianowego w kierunku sekcji. Wskaźnik ten stanowi empiryczną metodę doboru obudowy zmechanizowanej do warunków geologiczno-górnich, która uwzględnia wpływ pokładu i parametrów zrobów na wartość zaciskania wyrobisk eksploatacyjnych i obciążenie obudowy.

Współczynnik dociążenia n_{tz} dla ścian zawałowych

Dociążenie jest następstwem łamania się grubych warstw skalnych zalegających nad eksploatowanym wyrobiskiem. Oddziaływanie to generuje dodatkowe obciążenie w odniesieniu do obciążeń statycznych działających na obudowę wyrobiska ścianowego.

Stojaki hydrauliczne (siłowniki hydrauliczne główne) o dużych średnicach:

Stojaki hydrauliczne (zwane także siłownikami hydraulicznymi głównymi) o średnicach wewnętrznych pierwszego stopnia równych i większych od 0,30 m (dalej w pracy ujęte jako średnica I stopnia stojaka).

Udar hydrauliczny:

Zwany także uderzeniem hydraulicznym, zgodnie z (Brown F.T. 1962), to zjawisko silnych oscylacji ciśnienia w przewodzie pracującym pod ciśnieniem, wywołane szybkimi, wymuszonymi w krótkim czasie, zmianami prędkości przepływu cieczy.

Wstrząs górotworu

Wstrząs górotworu to wyładowanie energii skumulowanej w górotworze, objawiające się drganiem górotworu, powietrzną falą uderzeniową i zjawiskami akustycznymi. Wstrząs nie powoduje pogorszenia funkcjonalności wyrobisk i bezpieczeństwa ich użytkowania – zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. 2013 poz. 230).

Tąpnięcie

Zjawisko dynamiczne spowodowane wstrząsem górotworu, w wyniku którego wyrobisko lub jego część uległa gwałtownemu zniszczeniu lub uszkodzeniu, w następstwie czego nastąpiła całkowita lub częściowa utrata jego funkcjonalności lub bezpieczeństwa jego użytkowania – zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. 2013 poz. 230).

Oznaczenia:

B_c – sztywność cieczy, Pa ;

$C_{\epsilon 1}$ – stała empiryczna, $C_{\epsilon 1} = 1,44$;

$C_{\epsilon 2}$ – stała empiryczna, $C_{\epsilon 2} = 1,92$;

C_{μ} – stała empiryczna, $C_{\mu} = 0,09$;

D – średnica zewnętrzna przyłącza, m ;

d – grubość ścianki przyłącza, m ;

$D_{maxgór.}$ – maksymalne dociążenie z jaką górotwór będzie działał na obudowę, Nms^{-1} ;

D_z – punkt przegięcia krzywej osiadania stropu;

E – moduł Younga, Pa ;

E_t – prognozowana energia wstrząsu górotworu, MNm ;

e – liczba Eulera;

F_d – siła dociążająca stojak, N ;

F_N – podporność nominalna stojaka, N ;

F_r – podporność robocza stojaka, N ;

F_w – podporność wstępna stojaka, N ;

$F_{r\theta}$ – podporność robocza sekcji w odniesieniu do jednego stojaka uwzględniając jego nachylenie, N ;

$f(t)$ – przebieg czasowy dynamicznej siły oddziaływania górotworu na obudowę, N ;

g – przyśpieszenie ziemskie, $m \cdot s^{-2}$;

- H_t – odległość pionowa środka warstwy będącej prawdopodobnym źródłem wstrząsu, od pułapu wybieranego wyrobiska, m ;
- H_{rob} – wysokość robocza sekcji obudowy, m ;
- h – wysokość ściany, m ;
- h_b – wysokość stropu bezpośredniego, m ;
- h_z – wysokość stropu zasadniczego, m ;
- k_d – współczynnik obliczeniowy;
- k – współczynnik przeciążenia stojaka, bezwymiarowy;
- k_e – współczynnik zależny od systemu eksploatacji; dla zawału wynosi 1;
- \underline{k} – energia kinetyczna fluktuacji prędkości (burzliwości), m^2s^{-2} ;
- l_{PTI} – wysokość słupa cieczy pod tłokiem I stopnia, m ;
- l_h – wysokość słupa cieczy w stojaku, m ;
- M_p – moment podporowy obudowy, MNm ;
- M_Q – moment obciążenia wyrobiska ścianowego, MNm ;
- $N_{maxob.}$ – maksymalne przeciążenie obudowy, Nms^{-1} ;
- n_{zr} – współczynnik zależny od eksploatacji, w bezpośrednim sąsiedztwie pokładu przyjmuje wartość 0,3-1,0;
- n_{tz} – współczynnik dociążenia analizowanej ściany zawałowej;
- n_{tp} – współczynnik dociążenia analizowanej ściany podsadzkowej;
- P – ciśnienie płynu, Pa ;
- P_K – ciśnienie na wyjściu z zaworu, MPa ;
- P_{PT} – ciśnienie pod tłokiem, MPa ;
- P_P – spadek ciśnienia na przyłączy dla określonego przepływu masowego, Pa ;
- P_Z – spadek ciśnienia na zaworze dla określonego przepływu masowego, Pa ;
- PT – ciśnienie mierzone w przestrzeni podtłokowej stojaka, Pa ;
- PZ – ciśnienie mierzone przy zaworze hydraulicznym, Pa ;
- $P_{wst.}$ – ciśnienie wstępne stojaka, MPa ;
- $P_{rob.}$ – ciśnienie robocze stojaka, MPa ;
- $P_{zas.}$ – ciśnienie zasilnia stojaka, MPa ;
- Δp – ciśnienie udarowe, MPa ;
- p – lokalna produkcja fluktuacji wirowych;
- R_c – wytrzymałość skał stropu na ściskanie określona na podstawie badań, Pa ;
- S – powierzchnia przekroju modelu stojaka, m^2 ;
- S_1 – powierzchnia przekroju I stopnia stojaka, m^2 ;
- S_2 – powierzchnia przekroju II stopnia stojaka, m^2 ;
- T – okres drgań górotworu, s ;

t – czas, s;

t_{max} – czas narastania do maksymalnej wartości obciążenia, s;

V_{max} – maksymalna prędkości z jaką górotwór zaciska sekcje, ms^{-1} ;

Q_u – przepływ cieczy w układzie zabezpieczającym stojak, dm^3min^{-1} ;

Q_{ukt} – przepływ objętościowy układu, dm^3min^{-1} ;

v – prędkość płynu, $m \cdot s^{-1}$;

ϑ – okres fali uderzeniowej, ms;

α – nachylenie stojaka w odniesieniu prostopadłej do spągnicy, °;

ε – szybkość dyssypacji energii kinetycznej burzliwości, m^2s^{-3} ;

μ – lepkość dynamiczna płynu, Pa·s;

μt – lepkość turbulentna, Pa·s;

σk – burzliwa liczba Prandtla, $\sigma_k = 1,0$;

$\sigma \varepsilon$ – burzliwa liczba Prandtla $\sigma_\varepsilon = 1,3$;

ρ – gęstość płynu; $kg \cdot m^{-3}$;

δ – współczynnik tłumienia, s^{-1} ;

φ – kąt przesunięcia przebiegu siły w stojaku w odniesieniu do wymuszenia, rad

ω – pulsacja układu drgającego, $rad \cdot s^{-1}$;

* – splot funkcji;

1. WPROWADZENIE

Węgiel kamienny w Polsce pozyskiwany jest w zdecydowanej większości metodą głębinową z wykorzystaniem kompleksów ścianowych. Kompleks ścianowy składa się z maszyny urabiającej (kombajn lub strug), przenośnika ścianowego (odstawa urobionej skały ze ściany) oraz ze zmechanizowanej obudowy ścianowej (kierowanie stropem, ochrona przed opadem skał stropowych oraz oparcie dla pozostałych dwóch maszyn kompleksu). Zmechanizowana obudowa ścianowa stanowi jeden z ważniejszych elementów kompleksu z uwagi na swoją wartość, jak też wykonywaną funkcję (Domagała, Marianowski 2014; Jaszczuk 2007; Stoiński i inni 2018; Yetkin i inni 2017). Do 1 maja 2004 roku obudowa zmechanizowana wprowadzana była na rynek zgodnie z badaniami atestacyjnymi i decyzją Prezesa WUG. Po 1 maja 2004 roku wprowadzano obudowę na runek według uregulowań Parlamentu Europejskiego. Dla obudowy to dyrektywy: Maszynowa, ATEX, Niskonapięciowa i Kompatybilności Elektromagnetycznej. Podstawowa dyrektywa to dyrektywa Maszynowa, aktualnie 42/WE/2006 i zharmonizowane z nią polskie normy serii PN EN 1804. Do przywołanych polskich norm wyłączono przypadek ich obowiązywania dla stosowania obudów w warunkach trzęsień ziemi, interpretowanych jako wstrząs górotworu wywołany działalnością górniczą. Uzupełnieniem cytowanych norm jest rozporządzenie właściwego ministra w sprawie BHP, któremu podlega górnictwo. Rozporządzenie nakłada obowiązek na użytkownika obudowy spełnienia wymagań wynikających z upodatnienia sekcji tj. przystosowania jej do przejmowania obciążeń dynamicznych jako następstwa wstrząsu górotworu. Wymienione wymagania są dodatkowymi w odniesieniu do zharmonizowanych polskich norm i dotyczą wszystkich sekcji wprowadzanych do eksploatacji w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, niezależnie od zasad na jakich zostały wprowadzone na rynek.

Zgodnie z raportem rocznym, z 2018 roku, o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego (Kabiesz i inni 2018), wydobyte ogółem z rejonów zaliczonych do zagrożonych tąpniętami wynosiło około 54% ogólnej wielkości wydobywania. Ponieważ zaliczenie pokładu lub jego części do odpowiedniego stopnia zagrożenia tąpniętami nie jest miernikiem wystąpienia lub nie, wysokoenergetycznego wstrząsu górotworu, przyjąć należy, że wstrząsy górotworu dotyczą obecnie ponad 60% eksploatowanych pokładów i wykazują tendencję narastającą (pogarszające się warunki geologiczno-górniczne związane z coraz większą głębokością eksploatacji, występowanie zaszłości eksploatacyjnych w postaci pozostawionych resztek i/lub krawędzi eksploatacyjnych).

Interpretacją upodatnienia i jego oceną zajmuje się Główny Instytut Górnictwa (GIG) według metody własnej. Metoda oceny upodatnienia GIG jest analityczna i uwarunkowana od dokumentów dostarczanych przez producentów i przyszłych użytkowników. Metoda przewiduje również wykonanie badań dodatkowych (kontrolnych) potwierdzających parametry przyjmowane do oceny upodatnienia. Jednym z istotnych parametrów wykorzystywanych w ocenie upodatnienia są przepływy w układzie zabezpieczającym stojak przed przeciążeniem, jako skutek wstrząsu górotworu. Oczekuje się dużych przepływów masowych i dużej prędkości działania zabezpieczeń stojaków.

Wprowadzanie do eksploatacji sekcji obudów zmechanizowanych o bardzo dużych podpornościach, ze stojakami o średnicach I stopnia 0,30 m i większej, wyprowadzanie układów sterowania sekcją możliwie wysoko ponad spągnice a dodatkowo zastosowanie stojaków z wierconymi płaszczami cylindrów, spowodowało pojawienie się zjawisk nie obserwowanych dotychczas w praktyce i powodujących liczne uszkodzenia układów sterujących nowoczesnych obudów zmechanizowanych. Zjawiska te możemy określić jako udary (uderzenia) hydrauliczne. Pojawienie się udarów hydraulicznych związane jest również z dużymi objętościami cieczy w przestrzeniach roboczych stojaków. Udary hydrauliczne, tego typu, w układach zabezpieczających stojak charakteryzują się częstotliwościami drgań rzędu kilkuset herców (Hz) i amplitudami przekraczającymi kilkakrotnie wartości robocze elementów składowych. W ich wyniku następują uszkodzenia elementów składowych układów sterowania, w szczególności zaworów hydraulicznych, ciśnieniomierzy, bloków stojakowych oraz elementów złącznych. Efektem tego jest utrata podporności stojaka, a w przypadkach ekstremalnych niekontrolowane zaciśnięcie (zsuw) sekcji. Tym samym identyfikacja wymienionych zagrożeń i ich minimalizacja stanowi istotny problem tak dla ogólnie pojętego bezpieczeństwa pracy, jak również dla efektywności eksploatacji górniczej.

W rozprawie podejmuje się próbę opisu przyczyn występowania uszkodzeń powstałych w wyniku udarów hydraulicznych w stojakach o dużych średnicach I stopnia wykorzystując dostępne metody analityczne, badania stanowiskowe, jak również badania „*in situ*”. Na podstawie przeprowadzonych badań przewiduje się optymalizację analizowanych układów sterowania i zabezpieczenia stojaka oraz wprowadzenie zaproponowanych rozwiązań do stosowania.

Przeprowadzone analizy pozwolą także na usprawnienie obliczeń warunków upodatnienia sekcji ze stojakami o dużych średnicach.

2. STAN ZAGADNIENIA

Zmechanizowane obudowy ścianowe wprowadzane są na rynek zgodnie z Dyrektywami Parlamentu Europejskiego oraz zharmonizowanymi z nimi polskimi normami. Zmechanizowana obudowa ścianowa jako maszyna specjalnego przeznaczenia wymaga udziału strony trzeciej w procesie oceny jej zgodności z Dyrektywami Parlamentu Europejskiego. Podstawową dyrektywą jest Maszynowa (2006/42/WE) i ATEX (2014/34/UEz). W zależności od wyposażenia dodatkowo powinny być uwzględnione wymagania wynikające z Dyrektywy Niskonapięciowej (2014/35/UE) oraz Kompatybilności Elektromagnetycznej (2014/30/UEz). Wprowadzanie zmechanizowanej obudowy ścianowej na polski rynek nie jest równoznaczne z możliwością jej eksploatacji w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. W górnictwie węgla kamiennego w Polsce dotyczy to ponad 60% przypadków eksploatowanych pokładów. Ograniczenie wynika z zapisów zharmonizowanych polskich norm (z serii PN EN 1804) wyłączający ich obowiązywanie dla przypadków trzęsień ziemi. W prawodawstwie polskim przyjęto interpretację trzęsień ziemi jako wstrząs górotworu wywołany działalnością górniczą. Uzupełnieniem polskich norm zharmonizowanych z Dyrektywą Maszynową (2006/42/WE), odnośnie stosowania zmechanizowanych obudów ścianowych w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, jest aktualnie Rozporządzenie Ministra Energii (Rozporządzenie 2016) które w rozdziale 2 §523 ust. 1, pkt. 1, stanowi: „obudowę zmechanizowaną przeznaczoną do pracy w ścianach prowadzonych w rejonach występowania wstrząsów górotworu przystosowuje się przez upodatnienie do przejmowania obciążeń dynamicznych”. Ustawodawca nie określił kto i na jakich zasadach ocenia upodatnienie sekcji obudowy.

Problematykę wynikającą z cytowanego rozporządzenia ministra podjął Główny Instytut Górnictwa (GIG) i realizuje ją według metody własnej dostosowanej do zapisów w/w rozporządzenia. Metoda GIG zawiera kilka istotnych dla bezpieczeństwa wyrobiska ścianowego zagadnień, a mianowicie:

- wyznaczenie prognozowanych dociążeń dynamicznych sekcji, w odniesieniu do wartości roboczych, jako skutek wstrząsu górotworu,
- określenie niezbędnej podporności sekcji dla obciążeń statycznych z wykorzystaniem wskaźnika nośności stropu „g”,
- określenie bezpiecznego zakresu pracy sekcji dla danych warunków geologiczno-górnicznych i deklarowanych przez producenta parametrów technicznych sekcji i jej zabezpieczeń,

- określenie niezbędnych uzupełnień wyposażenia sekcji oraz badań dodatkowych w odniesieniu do zharmonizowanych polskich norm.

Metoda oceny upodatnienia według GIG jest metodą analityczną, wykorzystuje jednak dostępne rozwiązania techniczne sekcji, wyniki badań właściwości górotworu, wyniki prowadzonych badań poznawczych oraz wymagania z obowiązujących norm. Jest ona na bieżąco weryfikowana w odniesieniu do badań eksploatacyjnych i stanowiskowych. Pierwsze próby stosowania metody przypadają na lata 90. XX wieku i od tego czasu wykonano ponad 3 tysiące ocen upodatnienia, głównie dla potrzeb kopalń, producentów obudów a także celów poznawczych. W okresie stosowania metody, tj. ponad 20 lat, zebrano olbrzymią ilość informacji, które wykorzystano do jej uściślenia i optymalizacji. Na uściślenie i optymalizację metody miały wpływ również zmiany w zapisach rozporządzeń w sprawie BHP kolejnych Ministrów, dotyczące głównie uwarunkowań prawnych i technicznych.

W okresie stosowania metody nastąpiły istotne zmiany w zakresie wartości podporności sekcji obudów i sposobów ich sterowania. Pojawiło się także szereg nowych zjawisk fizycznych dotychczas nie obserwowanych, związanych głównie z dynamiką obciążeń, sterowaniem oraz zabezpieczeniami stojaków. Jednym z istotnych czynników jest stosowanie hydrauliki siłowej wykorzystującej stojaki o dużych średnicach I stopnia (ponad 0,30 m, w Polsce aktualnie wykorzystuje się stojaki o średnicach 0,42 m), zwiększenie podziałki sekcji względem standardowej 1,5 m (aktualnie podziałka od 1,75 do 2,25 m) i zwiększenie prędkości przestawiania sekcji. Na polski rynek zostały także wprowadzone kompleksy strugowe które umożliwiają pracę w systemie sterowania automatycznego.

Zwiększanie średnic stojaków, a tym samym ich podporności jest tendencją światową. W ciągu ostatniej dekady w Chinach wydobywanie węgla w trudnych warunkach geologiczno-górnictwowych spowodowało podwojenie podporności stosowanych stojaków. Obecnie maksymalna podporność stojaków obudów zmechanizowanych mieści się w zakresie 5÷10 MN. Dla ścian o bardzo dużych wysokościach (powyżej 6,0 m) podporność stojaków sekcji dochodzi nawet do 20 MN, są to aktualnie największe stosowane podporności (Wanga, Zhanga, Li 2015). Tendencję zwiększania podporności sekcji obudów zmechanizowanych obserwuje się również w innych krajach jak np. USA, gdzie maksymalna podporności stojaków hydraulicznych w sekcji wzrosła do 13,3 MN w okresie ostatnich 10 lat (Barczak 2012, Wanga, Zhanga, Li 2015). Dla porównania w jednej ze ścian kopalni węgla kamiennego w Australii, Moranbah North, w już 2009 roku zastosowano sekcje obudowy zmechanizowanej o podporności stojaków wynoszącej 17,5 MN (Martin et al. 2012).

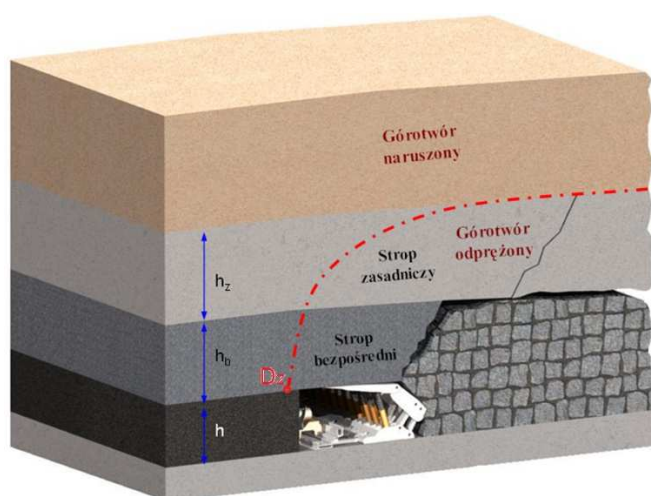
Wraz z wprowadzeniem do eksploatacji w Polsce stojaków o dużych średnicach i odpowiednich dla nich zabezpieczeń przed przeciążeniami, pojawiły się zjawiska udarów hydraulicznych oraz wzbudzania się układów. Ich zakres i intensywność prowadzą często do zagrożenia bezpieczeństwa w ścianie, a w szczególnych przypadkach do utraty podporności i niekontrolowanego zsuwu (zaciśnięcia) sekcji obudowy zmechanizowanej. Urazy hydrauliczne według wstępnych ocen powstają wskutek zaburzenia przepływu strugi cieczy o bardzo dużej prędkości, natężeniu przepływu i ciśnieniu, co ściśle związane jest z układami zabezpieczającymi stojak przed przeciążeniem, a to jest istotnym elementem w ocenie upodatnienia sekcji.

Układy zabezpieczające są, w wielu przypadkach eksploatacyjnych, ostatnim ogniwnem zabezpieczającym sekcję obudowy przed uszkodzeniem wskutek wstrząsu górotworu (Irresberger, Gräwe, Migenda 2003, Gil, Kubiesa, Stoiński 2010; Kalukiewicz, Marianowski 2011, Kalukiewicz, Marianowski, Kipczak 2011, Stoiński 1999, 2000, 2018). Wzbudzenia układów sterujących stojaków są często wynikiem nieprawidłowej pracy zaworu zwrotnego sterowanego. Oczekiwane duże przepływy cieczy zasilającej stojak związane głównie ze wzrostem średnic stojaków niesie za sobą również problemy techniczne, wynikające z konieczności przełączania strugi cieczy o dużej zmienności ciśnień i natężenia przepływu.

2.1. Dobór podporności sekcji do warunków geologiczno-górnich z wykorzystaniem wskaźnika nośności stropu „g”

Zjawiska, jakie zachodzą w górotworze podczas prowadzenia eksploatacji pokładu węgla kamiennego, od dawna budziły szerokie zainteresowania wśród specjalistów górniczych, co przyczyniło się do powstania wielu teorii dotyczących rozkładu naprężeń (ciśnień) w otoczeniu eksploatacji ścianowej. Prowadzone z końcem XIX wieku badania modelu górotworu przez Fayola i Trompetera stały się podstawą teorii, która następnie została rozwinięta przez Protodiakonowa, Eckardta, Haaka, Gilltzerę czy Sprutha (Spruth 1951, Biliński 1968, Kłeczek 1994, Majcherczyk, Szaszenko, Sdwiżkowa 2006). W teorii tej zostało przyjęte, że podczas eksploatacji pokładu węgla nad ścianą tworzy się strefa odprężona w kształcie sklepienia, zwana także strefą Trompetera. W strefie tej znajdują się skały rozwarstwione i spękane, które swym ciężarem oddziałują na pokład, obudowę oraz zroby co prowadzi do powstania ciśnienia wspornikowego przed ścianą i w zrobach. W polskiej literaturze naukowej ciśnienie to jest określono jako ciśnienie eksploatacyjne, wynikające z osiadania warstw stropu zasadniczego w strefie zawału, co powoduje dodatkowy nacisk na pokład w rejonie czoła ściany (Znański 1964). Oprócz teorii sklepienia ciśnień opracowano

również inne teorie dotyczące rozkładu ciśnień nad wyrobiskiem ścianowym. W Polsce najbardziej rozpowszechnione zostały teorie fali ciśnień i reakcji podłoża opracowane przez Budryka oraz Boreckiego (Prusek 2016). Model górotworu wokół ściany zawałowej został także opracowany przez Bilińskiego (Biliński, Dreinert, Kostyk 1996; Biliński, Kostyk, Prusek 1997; Biliński 2005). Model ten wyróżnia górotwór naruszony i odprężony jak pokazano to na rysunku 2.1. W górotworze odprężonym znajdują się warstwy stropu bezpośredniego, charakteryzujące się silnymi spękaniem, przechodzące w zawał za linią obudowy zmechanizowanej. W górotworze odprężonym znajdują się warstwy stropu zasadniczego, w których intensywność występowania spękań jest mniejsza, przez co zachowują one tzw. ciągłość geometryczną w strefie zrobów.



Rys. 2.1. Schemat górotworu odprężonego wokół ściany zawałowej; gdzie: h – wysokość ściany, h_b – wysokość stropu bezpośredniego, h_z – wysokość stropu zasadniczego, D_z – punkt przegięcia krzywej osiadania stropu (Biliński, Dreinert, Kostyk 1996; Biliński, Kostyk, Prusek 1997; Biliński 2005)

W literaturze światowej można znaleźć wiele pozycji opisujących metody doboru obudowy do danych warunków geologiczno-górnich. Do pozycji literaturowych które w szerokim zakresie opisują metody obliczania obciążenia sekcji obudowy w ścianie, z uwzględnieniem obciążenia i zmiennego zakresu jej wysokości, są (Hussein, Ibrahim, Imbaby 2013) oraz (Shi i inni 1997). W literaturze zagranicznej można znaleźć także modele komputerowe doboru obudowy, jak np. Design of Powered Support Selection Model w skrócie DEPOWS, który w swoich obliczeniach uwzględnia rodzaj skał stropu bezpośredniego i zasadniczego, podporność wstępną obudowy oraz powierzchnię stropnicy (Peng 2006, 2007, Prusek 2016).

Do warunków kopalń polskich, dla określania stanu utrzymania wyrobiska ścianowego, stosowana jest metoda, uwzględniająca podporność planowanej

do zastosowania obudowy ścianowej i oparta jest ona na zasadzie dopuszczalnego ugięcia stropu wyrobiska (Biliński 1982, 1983, 1987, 2005; Biliński, Kostyk, Prusek 1997; Prusek, Rajwa 2004). Polega na obliczeniu wielkości wskaźnika nośności warstw stropu, obrazującego zdolność do zachowania ich ciągłości geometrycznej nad wyrobiskiem. Wartość wskaźnika nośności warstw stropu jest zależna od średniej wielkości konwergencji liczonej wzdłuż rozpiętości wyrobiska, rozumianą jako odległość od czoła ściany do miejsca tworzenia się zawału, i wzajemnej zależności podporności obudowy do obciążenia wyrobiska. Obciążenie wyrobiska oraz podporność obudowy zależą od czynników naturalnych, czyli od budowy i własności górotworu (głębokość eksploatacji, budowę górotworu i jego własności mechaniczne, warunki stropowe i spągowe wyrobiska, własności mechaniczne pokładu oraz jego nachylenie) oraz od czynników technicznych wynikających z działalności człowieka (wysokość i długość wyrobiska, rozpiętość wyrobiska, podporność i charakterystykę obudowy, szybkość przesuwania się frontu eksploatacji, otoczenie zrobów oraz nadebranie i podebranie pokładu).

Warunki utrzymania wyrobiska ścianowego zmieniają się w zależności od występowania krawędzi, uskoków, zmian w rodzaju i układzie skał otaczających, itp. Dlatego też w omawianej metodzie dokładnie określa się zmienność warunków naturalnych i technicznych oraz wyodrębnia się odcinki na wybiegu ściany uwzględniające te warunki.

Następnie oblicza się wartości:

- ciśnienia górotworu, działającego na pokład w rejonie ściany,
- obciążenia wyrobiska,
- podporności obudowy zastosowanej w wyrobisku,
- wskaźnika nośności stropu „g”.

Wartość wskaźnika nośności stropu oblicza się ze wzoru (Biliński 2005):

$$g = \frac{1}{\frac{z_{L1}}{z_g} + 0,3} \quad (2.1)$$

gdzie:

z_{L1} – nachylenie stropu występujące na pierwszym od ociosu metrze rozpiętości wyrobiska, liczone w mm osiadania, przypadających na 1,0 m rozpiętości stropu (rys. 2.2.):

$$z_{L1} = \frac{1}{0,012 \cdot \frac{M_p}{M_Q} + 0,002} , mm \quad (2.2)$$

Z_g – graniczna wartość nachylenia stropu utworzonego z danego rodzaju skały, powyżej której staje się on zbiorowiskiem luźnych bloków skalnych, również liczona w mm osiadania, przypadających na 1,0 m rozpiętości stropu (rys. 2.2):

$$Z_g = \frac{k_e}{\frac{0,05}{R_c} + 0,006}, mm \quad (2.3)$$

podstawiając do wzoru zależności Z_{L1} i Z_g otrzymamy dla systemu zawalowego:

$$g = \frac{1}{\frac{\frac{0,05}{R_c} + 0,006}{0,012 \cdot \frac{M_p}{M_Q} + 0,002} + 0,3} \quad (2.4)$$

gdzie :

k_e – współczynnik zależny od systemu eksploatacji; dla zawalu wynosi 1,

R_c – rzeczywista wytrzymałość na ściskanie stropu określona na podstawie badań w danym polu eksploatacyjnym, MPa,

M_p – moment podporowy obudowy – wypadkowa wartość siły podporności obudowy pomnożona przez ramię jej działania w wyrobisku, MNm,

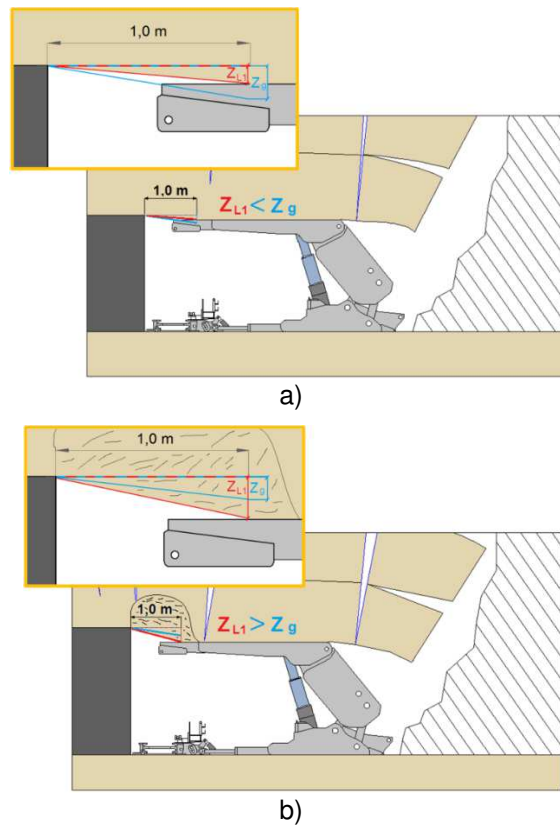
M_Q – moment obciążenia wyrobiska ścianowego – iloczyn wartości obciążenia wyrobiska i ramienia jego działania, MNm.

Wartości wskaźnika „g” poniżej 0,7 wskazują na bardzo złe warunki utrzymania stropu, (duże zagrożenie zawalem); wartości równe lub większe od 0,7 a mniejsze od 0,8 wskazują na utrudnione warunki utrzymania stropu (możliwość występowania utrudnień w postaci obwałów skał stropowych do przestrzeni roboczej wyrobiska); wartości równe lub większe 0,8 wskazują na poprawne warunki utrzymania stropu – tabela 2.1.

Tabela 2.1. Wartości wskaźnika nośności stropu „g”

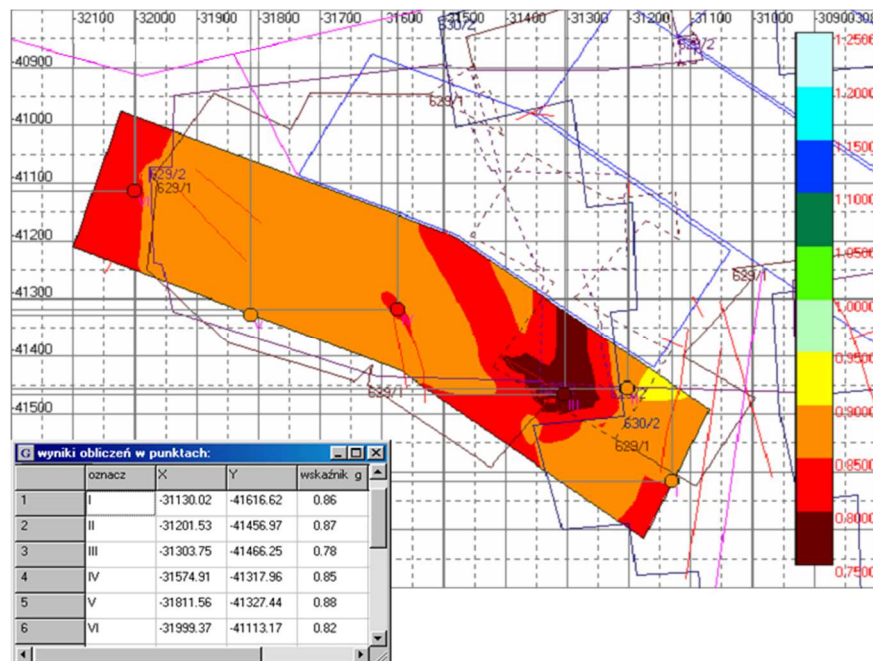
Wskaźnik nośności stropu „g”		
„g” < 0,7	0,7 < „g” < 0,8	„g” > 0,8
Stan zagrożenia zawalem	Utrudnione warunki utrzymania stropu	Poprawne warunki utrzymania stropu

Na rysunku 2.2. pokazano przykłady warunków utrzymania stropu w ścianie w zależności od wartości nachylenia jednostkowego i granicznego stropu (Prusek 2016).



Rys. 2.2. Graficzna prezentacja utrzymania stropu w ścianie (Prusek 2016);
 a) nachylenie jednostkowe Z_{L1} mniejsze od nachylenia granicznego stropu Z_g – dobre warunki utrzymania stropu, b) nachylenie jednostkowe Z_{L1} większe od nachylenia granicznego stropu Z_g – pogorszone warunki utrzymania stropu

Na rysunku 2.3. pokazano rezultaty obliczeń wskaźnika „g” na całym wybiegu ściany planowanej do wydobycia systemem zawałowym.



Rys. 2.3. Rozkład wartości wskaźnika nośności stropu „g” na wybiegu analizowanej ściany (Płonka 2004)

2.2. Wyznaczanie stopnia dociążenia obudowy zmechanizowanej z wykorzystaniem współczynnika n_{tz}

W literaturze możemy znaleźć różne metody wykorzystywane do oceny stateczności wyrobisk ścianowych zagrożonych oddziaływaniem zjawisk sejsmicznych. Chudek i Zorychta (1996) podają wzór do obliczania obciążenia dynamicznego obudowy wyrobisk górniczych, które zależne jest od energii dynamicznej określającej działanie wstrząsu i wytrzymałości węgla na ściskanie. Gwiazda w swojej publikacji (1997) wprowadził pojęcie mocy przetwórczej obudowy. Tutaj o odporności obudowy na tąpnięcia decyduje jej zdolność do przemian energetycznych. Obudowa powinna być zdolna do zmiany energii kinetycznej występującej w czasie tąpnięcia na prace zsuwu stojaka.

Metodę która pozwala także na prognozowanie energii wstrząsów górotworu podczas eksploatacji pokładu węgla przedstawiają publikacje Bilińskiego (1981, 1982, 1983, 1985, 1989). W metodzie podano zależność pozwalającą obliczyć energię wstrząsu górotworu, a także współczynnik zwiększenia dociążenia obudowy. Dociążenie zmechanizowanej obudowy ścianowej określa się wykorzystując model górotworu naruszonego (rys. 2.1) i opisane jest współczynnikiem dociążenia n_{tz} . Dociążenie jest następstwem łamania się grubych warstw skalnych (głównie piaskowców o dużej wytrzymałości na ściskanie) zalegających nad eksploatowanym wyrobiskiem. Oddziaływanie to generuje dodatkowe obciążenie, w odniesieniu do obciążeń statycznych działających na obudowę. Wartość współczynnika dociążenia oblicza się według zależności wyznaczonej w sposób empiryczny, a mianowicie:

- dla ściany zawałowej:

$$n_{tz} = 1 + \frac{n_{zr}}{0,04 \cdot \left(\frac{H_t}{E_t}\right)^{0,7} + 0,04 \cdot H_t + 0,5} \quad (2.5)$$

- dla ściany podsadzkowej:

$$n_{tp} = 1 + \frac{n_{zr}}{0,025 \cdot \left(\frac{H_t}{E_t}\right)^{0,7} + 0,025 \cdot H_t + 0,3} \quad (2.6)$$

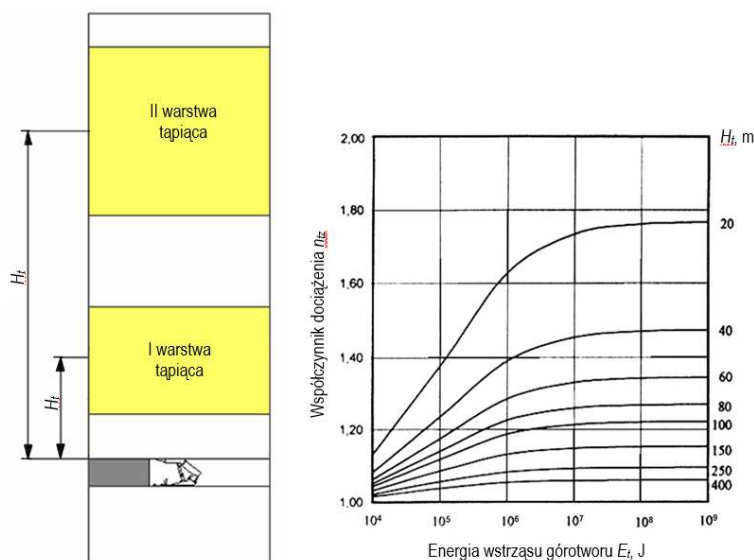
gdzie:

n_{zr} – współczynnik zależny od eksploatacji. W bezpośrednim sąsiedztwie pokładu przyjmuje wartość 0,3-1,0,

H_t – odległość pionowa środka warstwy będącej prawdopodobnym źródłem wstrząsu, od pułapu wyrobiska wybierkowego, m,

E_t – energia wstrząsu górotworu, MNm.

Graficznie sposób obliczania współczynnika dociążenia oraz jego zmienność (wyznaczona dla górnośląskiego okręgu węglowego) przedstawiono na rysunku 2.4. Do obliczeń upodatnienia sekcji obudowy wykorzystuje się największą obliczoną wartość, dla analizowanych warstw wstrząsogennych.



Rys. 2.4. Sposób wyznaczania współczynnika dociążenia n_{tz} i jego zmienność; gdzie: H_t – odległość pionowa środka warstwy będącej prawdopodobnym źródłem wstrząsu, od pułapu wyrobiska wybierkowego, m; E_t – prognozowana energia wstrząsu górotworu, MNm (Biliński 1981, 1982, 1983, 1985, 1989; Stoiński i inni 2018)

Dociążenie obudowy w wyniku wstrząsu górotworu oblicza się wg wzoru (Biliński 1981, 1982, 1983, 1985, 1989):

$$F = F_r \cdot n_{tz} \quad (2.7)$$

gdzie:

F_r – obciążenie robocze (wg nastawy zaworów przelewowych), MN;

n_{tz} – obliczony współczynnik dociążenia analizowanej ściany zawałowej.

Dociążenie obudowy w wyniku wystąpienia wstrząsu górotworu z punktu widzenia dynamiki przebiegu, przyjmuje się jako udar masy o dużej wartości przy małym jej przemieszczeniu, w odniesieniu do wysokości wyrobiska. Przyjęcie takiego założenia ma istotny wpływ na relacje obliczeniowe obciążenia sekcji obudowy.

Według rysunku 2.4. oraz (Stoiński i inni 2018) wartość współczynnika n_{tz} zawiera się w przedziale $1,00 \div 1,80$. Na potrzeby GIG na podstawie wartości wskaźnika dociążenia określa się stopień zagrożenia wstrząsami górotworu analizowanego wyrobiska ścianowego, według tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Stopień zagrożenia wstrząsami górotworu wyrobiska ścianowego na podstawie wartości współczynnika dociążenia n_{tz} (Stoiński i inni 2018)

Wartość wskaźnika n_{tz}	1,0÷1,1	1,1÷1,2	1,2÷1,3	1,3÷1,4	> 1,4
Zagrożenie wyrobiska	brak	słabe	średnie	silne	bardzo silne

2.3. Wyznaczenie obciążenia sekcji obudowy dla przypadku gwałtownego zaciśnięcia wyrobiska

Przypadki gwałtownego zaciśnięcia wyrobiska występują wtedy, gdy nie następuje łamanie się mocnych warstw skalnych zalegających bezpośrednio lub też w niewielkiej odległości od pułapu wyrobiska, a jedynie ich przemieszczanie z jednego położenia równowagi w drugie. Przyjmuje się w takim przypadku, że obciążenie sekcji obudowy jest wyłącznie uzależnione od oporu jaki stawia zaciskana obudowa. Wielkościami fizycznymi decydującymi w takim przypadku o wartości obciążenia jest prędkość zaciskania oraz maksymalna praca jaką może rozwinąć sekcja bez jej uszkodzenia. Przyjmując, że górotwór wymusza przemieszczenie (zaciskanie) sekcji niezależnie od oporu jaki ona wywołuje można zapisać to następującą zależnością (Szurgacz 2011a, 2011b, 2019):

$$D_{maxgór.} < N_{maxob} \quad (2.8)$$

gdzie:

$D_{maxgór.}$ – maksymalna moc z jaką obciąża górotwór obudowę przy założeniu przyjętej prędkości zaciskania sekcji,

$N_{maxob.}$ – maksymalna moc rozwijana przez sekcje obudowy.

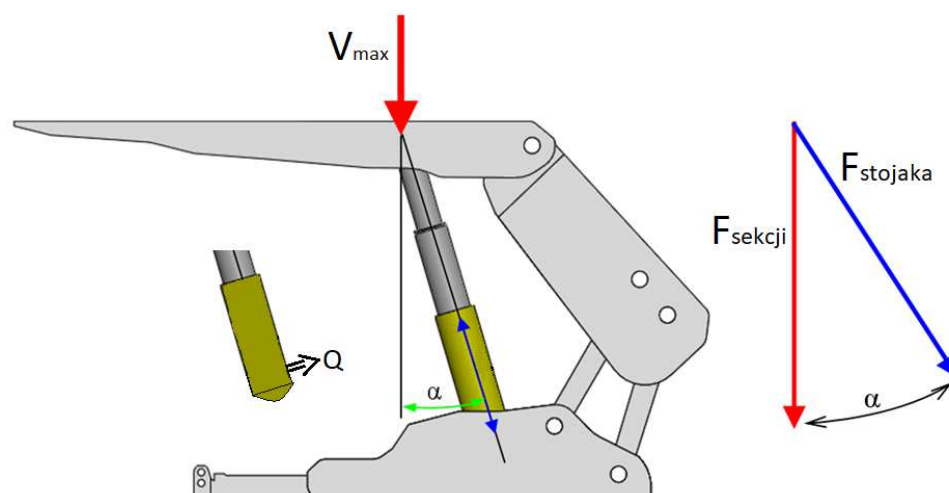
$$N_{maxob.} = Q \cdot P_{max} \quad , N \cdot ms^{-1} \quad (2.9)$$

gdzie:

Q – przepływ układu dla ciśnienia w stojaku odpowiadający P_{max} ,

P_{max} – ciśnienie w stojaku odpowiadające F_{max} .

Należy zaznaczyć, że jest to przypadek zaciskania obudowy z jej dopuszczalnymi podpornościami.



Rys. 2.5. Schemat wykorzystany w obliczeniach mocy układu górotwór-obudowa

Wykorzystując schemat obliczeniowy przedstawiony na rysunku 2.5 można wyprowadzić relacje w odniesieniu do stojaka, a mianowicie:

$$D_{maxgór} = V_{max} \cdot F_{max} \text{ , } N \cdot ms^{-1} \quad (2.10)$$

gdzie:

V_{max} – maksymalna prędkości z jaką górotwór zaciska sekcję, obliczana jest ze wzoru:

$$V_{max} = (n_{tz} - 1) \text{ , } ms^{-1} \quad (2.11)$$

F_{max} – maksymalna siła obciążająca sekcję, odniesiona do stojaka jest obliczana ze wzoru:

$$F_{max} = F_r \cdot n_{tz} \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \text{ , } N \quad (2.12)$$

gdzie:

F_r – podporność robocza stojaka, N .

Maksymalna siła jaką może obciążać sekcję górotwór jest wynikiem nastawy zaworu upuszczającego ciesz ze stojaka. Na maksymalną prędkość zaciskania, sekcja nie ma wpływu. Maksymalną wartość siły obciążającej sekcję F_{max} łączy się ze współczynnikiem dociążenia n_{tz} , a zatem:

$$F_{max} = F_{r\phi} \cdot n_{tz} \text{ , } N \quad (2.13)$$

gdzie:

$F_{r\phi}$ – podporność robocza sekcji w odniesieniu do jednego stojaka uwzględniając jego nachylenie (rys. 2.5),

n_{tz} – współczynnik dociążenia powstały w wyniku wstrząsu górotworu.

Moc górotworu zredukowana do stojaka opisuje zależność:

$$D_{maxgór.} = \frac{Fr(n_{tz}^2 - n_{tz})}{\cos\alpha}, Nms^{-1} \quad (2.14)$$

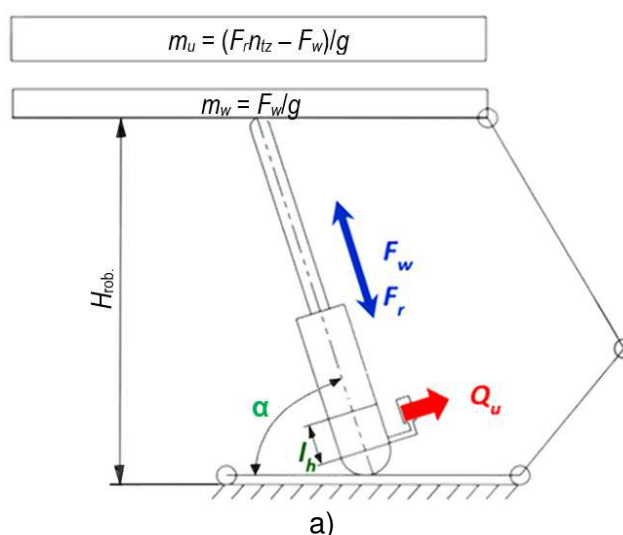
Porównując zależności (2.13) i (2.14) oraz wyznaczając wartość przepływu układu zabezpieczającego stojak, dla którego nie nastąpi przeciążenie obudowy, otrzymujemy:

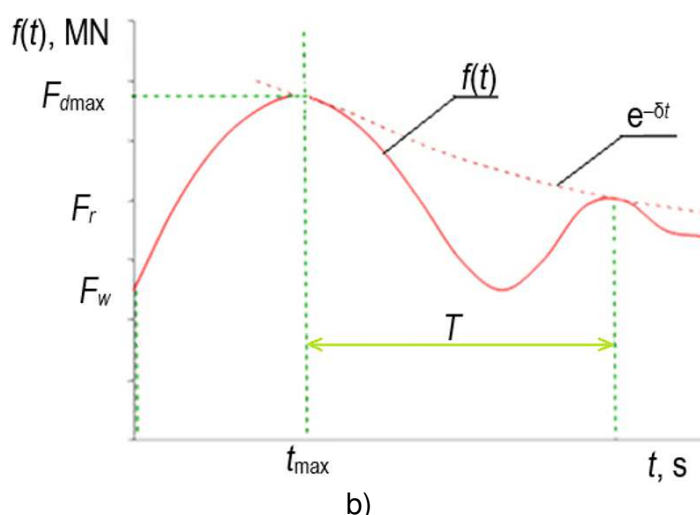
$$Q_u \geq \frac{F_r(n_{tz}^2 - n_{tz})}{2P_r \cos\alpha} \cdot 6 \cdot 10^4, dm^3min^{-1} \quad (2.15)$$

Obliczony w podany sposób przepływ powinien zabezpieczyć obudowę przed uszkodzeniem, kosztem zaciśnięcia jej do wysokości w której nastąpi stan równowagi i zahamowanie przemieszczania się warstw stropowych. Metoda z powodzeniem była wykorzystana w KGHM Polska Miedź jak również w KWK Śląsk (Szurgacz 2011a, 2011b, 2019, Stoiński i inni 2018).

2.4. Metoda oceny upodatnienia według GIG – wyznaczenie bezpiecznego zakresu pracy obudowy

Metoda oceny upodatnienia jest metodą analityczną opierającą się na opisie modelu górotworu naruszonego wg A. Bilińskiego oraz modelu obliczeniowym płaskim sekcji obudowy o jednym stopniu swobody i stałych skupionych. Podstawowe zasady metody prezentuje poglądowy rysunek 2.6.





Rys. 2.6. Model obliczeniowy płaski o parametrach skupionych sekcji obudowy obciążonej udarem mas z nadległego pokładu (a) i prognozowany przebieg siły obciążającej sekcję (b) (Stoiński 1998; Rajwa, Prusek, Stoiński 2016; Stoiński 2018);

gdzie: t_{\max} – czas narastania do maksymalnej wartości obciążenia, l_h – wysokość słupa cieczy w stojaku, H_{rob} – wysokość robocza sekcji obudowy, Q_u – przepływ cieczy w układzie zabezpieczającym stojak, m_u – masa dociążająca sekcję, m_w – masa wstępnie obciążająca sekcję, T – okres drgań, e – liczba Eulera; objaśnienia pozostałych symboli pod wzorem (2.16)

Przebieg siły w stojaku w zależności od czasu wyraża wzór (Stoiński 1998, Stoiński i inni 2018):

$$f(t) = \frac{1}{\cos(90 - \alpha)} (F_w + F_d(1 + k_d e^{-\delta t} \sin(\omega t - \varphi))) \quad (2.16)$$

gdzie:

f – siła w stojaku, N;

$F_d = F_r n_{tz} - F_w$ – siła dociążająca stojak, N, przy czym:

F_r – podporność robocza obudowy, N; n_{tz} – współczynnik dociążenia; F_w – podporność wstępna stojaka, N;

k_d – współczynnik obliczeniowy;

t – czas, s;

α – kąt pochylenia stojaka względem spągnicy, °;

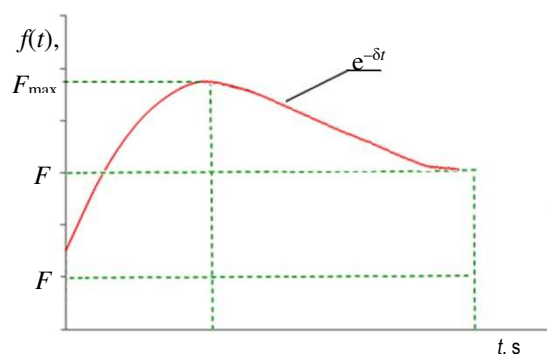
δ – współczynnik tłumienia układu, s^{-1} ;

φ – kąt przesunięcia przebiegu siły w stojaku w odniesieniu do siły obciążającej, rad;

ω – pulsacja układu drgającego, s^{-1} .

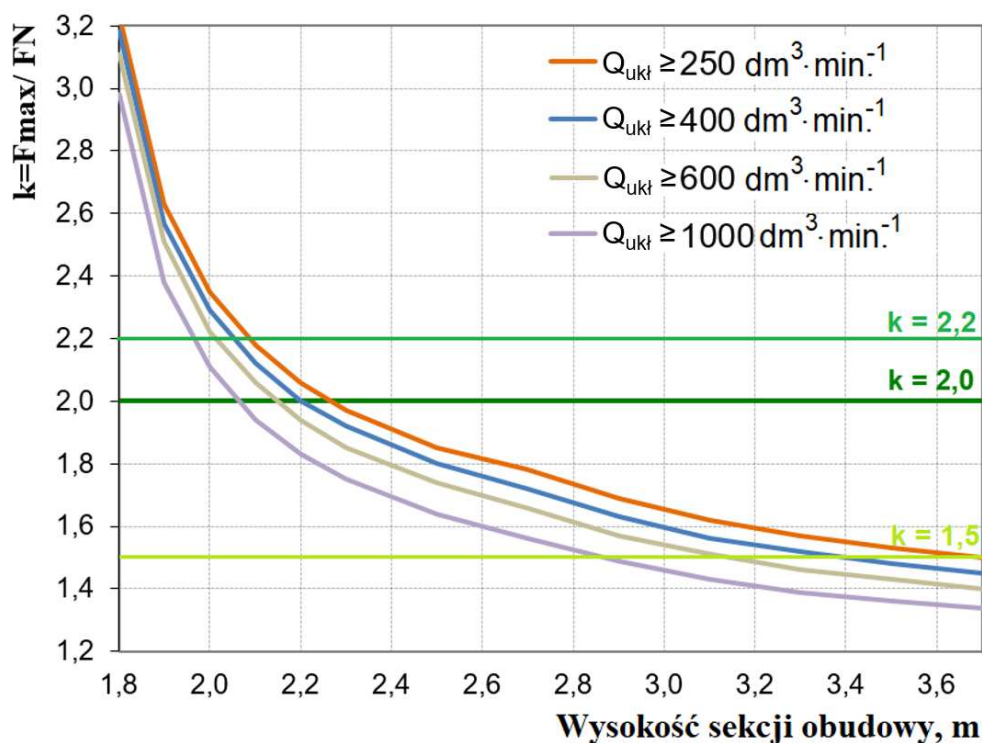
Współczynniki k_d , α , δ , φ , ω są obliczane na podstawie parametrów technicznych obudowy (sekcji) i wartości dociążenia obudowy (współczynnik n_{tz}). Obliczony przebieg dynamiczny siły ma charakter sinusoidy tłumionej. Dla przypadków w których

występuje silne tłumienie drgań, (dla bardzo dużych przepływów w układach ograniczających ciśnienie w stojaku), przebieg dynamiczny przechodzi w aperiodyczny (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Przebieg dynamiczny siły w stojaku dla bardzo dużych wartości tłumienia; objaśnienia symboli patrz: rysunek 2.6 i wzór (2.16)

Wartość siły maksymalnej obliczeniowej stojaka odniesiona do wartości siły nominalnej uwzględniającej współczynnik bezpieczeństwa w badaniu pełnym (typu) wg PN EN 1804-2 dla poszczególnych wysokości obudowy (sekcji) stanowi o bezpiecznym zakresie pracy. Przykładową charakterystykę prezentuje rysunek 2.8.



Rys. 2.8. Przykładowa charakterystyka upodatkowania obudowy; gdzie: $Q_{ukł}$ – przepływ objętościowy układu hydraulicznego, k – współczynnik bezpieczeństwa stojaka w badaniu pełnym (wg PN EN 1804-2)

Integralną częścią metody upodatnienia jest stwierdzenie, że zmechanizowana obudowa ścianowa pracująca w bezpiecznym zakresie pracy sekcji zapewnia również wymaganą minimalną podporność dostosowaną do obciążenia wyrobiska ścianowego prowadzonego w danych warunkach geologiczno-górnicych. Ocena taka ma na celu zapewnienie dobrych warunków utrzymania stropu oraz ograniczenia niekorzystnych zjawisk eksploatacyjnych jak np. opady i obwały skał stropowych, na podstawie wartości wskaźnika „g” (punkt 2.1 niniejszej pracy).

2.5. Badania dodatkowe oceny pracy stojaka

Badania dodatkowe stojaka hydraulicznego stanowią istotny element uzupełniający ocenę sposobu upodatnienia i doboru obudowy do warunków geologiczno-górnicych. Szczególnie istotne są dla oceny pracy stojaka wraz z zastosowanymi zabezpieczeniami przy obciążeniu dynamicznym jako pochodną wstrząsu górotworu. Badania dodatkowe są prowadzone w stanowiskach laboratoryjnych, analitycznie, jak również bezpośrednio w ścianie w warunkach "*in situ*". Wyróżnić można badanie samego stojaka, stojaka z układami zabezpieczającymi przed przeciążeniem, badania poszczególnych elementów wyposażenia sekcji, jak również całej sekcji (Budirsky 1978, 1985; Czubaszek, Szweda 2012; Czubaszek, Madejczyk 2012; Domagała 2009; Gil, Kubiesa, Stoiński 2010; Jaszczuk 2004; Kipczak 2011; Klishin 2002; Madejczyk 2012, 2013; Mika 2003; Pacześniowski, Pytlik, Radwańska 2007; Pytlik 2008, 2015; Stoiński, Madejczyk 2004; Szurgacz, Brodny 2019, 2020).

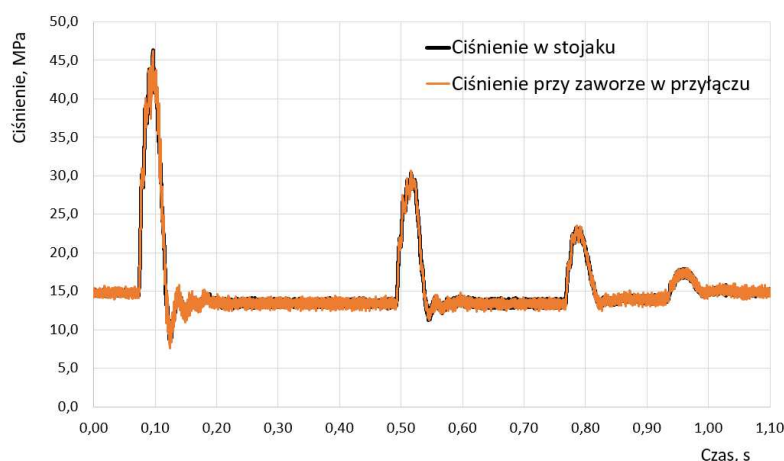
Istotnym problemem występującym w badaniach laboratoryjnych (stanowiskowych) jest trudność uzyskania obciążeń dynamicznych zbieżnych z występującymi w warunkach "*in situ*". Wiąże się to z udziałem w warunkach rzeczywistych olbrzymich mas skalnych, których ruchy dynamiczne są zdecydowanie wolniejsze od tych wytwarzanych w warunkach laboratoryjnych (stanowiskowych) – tutaj dysponujemy znacznie mniejszymi masami o dużych prędkościach przemieszczania się. Prasy szybkiego zsuwu umożliwiające uzyskiwanie obciążeń o założonym przebiegu w funkcji czasu, z uwagi na wysokie koszty ich utrzymania, zostały w Europie zlikwidowane (prasa firmy Schenck w laboratorium MPA Dortmund, Niemcy oraz prasa Schloemanna w Ostroj Opava, Czechy). Uzyskiwane wyniki badań z laboratoriów nie zawsze można odnieść do rzeczywistości, co niekiedy skutkuje nieprawidłowymi ocenami pracy obudowy i jej elementów. Literatura w wymienionym zakresie jest niezwykle obszerna tak w postaci książkowej jak również publikacyjnej (Holub i inni 2011; Kasprusz 2007, 2010; Singh. Singh 2009; Stoiński 1985, 1990, 1999,

2000; Stoiński i inni 2018; Szweda 2001, 2003, 2004; Wójcik 1996). Liczące się stanowiska badawcze w wymienionym zakresie aktualnie posiada w Polsce Główny Instytut Górnictwa i ITG KOMAG oraz w Czechach TLO Opava. Wymienione stanowiska powstały w latach 90. ubiegłego wieku i były przeznaczone do badania głównie stojaków o średnicach I stopnia do 0,25 m. Obecnie parametry techniczne wymienionych stanowisk są niewystarczające do badań stojaków będących na rynku, o znacznie większych średnicach i podpornościach.

Główny Instytut Górnictwa oraz TLO Opava posiadają podobne stanowiska do badań pod obciążeniem dynamicznym, wykorzystujące obciążenie udarem swobodnie spadającej masy (20 Mg). Na rysunku 2.9 przedstawiono stanowisko w GIG oraz przykładowy zarejestrowany przebieg ciśnienia w badanym stojaku, podobnie na rysunku 2.10 przedstawione jest stanowisko w TLO Opava.



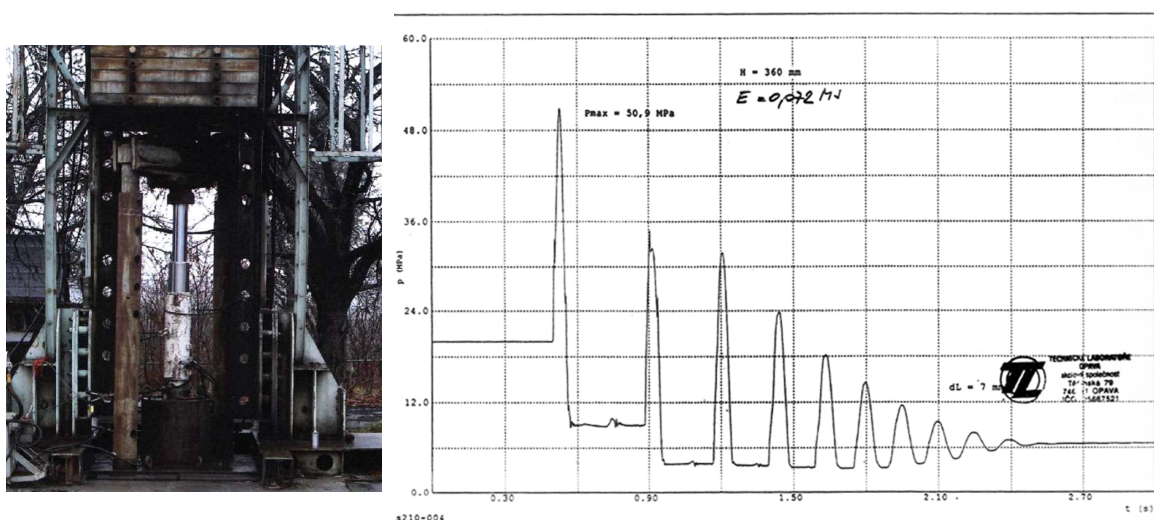
a)



b)

Rys. 2.9. Stanowisko do badań dynamicznych udarem masy w GIG (źródło własne); a) wygląd stanowiska; b) zarejestrowany przebieg ciśnienia w stojaku (stojak dwutelskopowy, średnica I stopnia \varnothing 0,25 m, z zaworem hydraulicznym, $E_u = 0,08$ MJ) (badania własne)

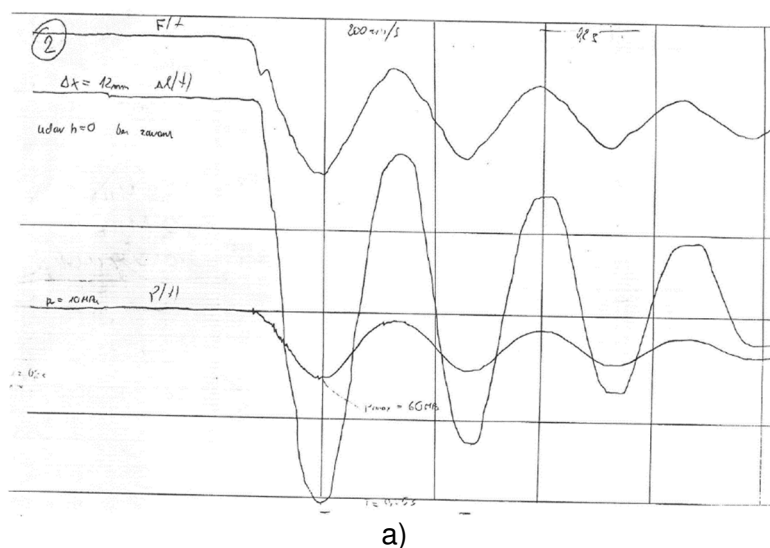
Zarejestrowany przebieg ciśnienia (rys. 2.9 b) charakteryzuje sposób obciążenia stojaka masą której ciężar jest mniejszy od jego podporności. Przebieg pierwszego impulsu zbliżony jest do przebiegu sinusoidalnego w zakresie połowy okresu drgań układu. Okres drgań układu zawiera się w przedziale kilkudziesięciu milisekund.

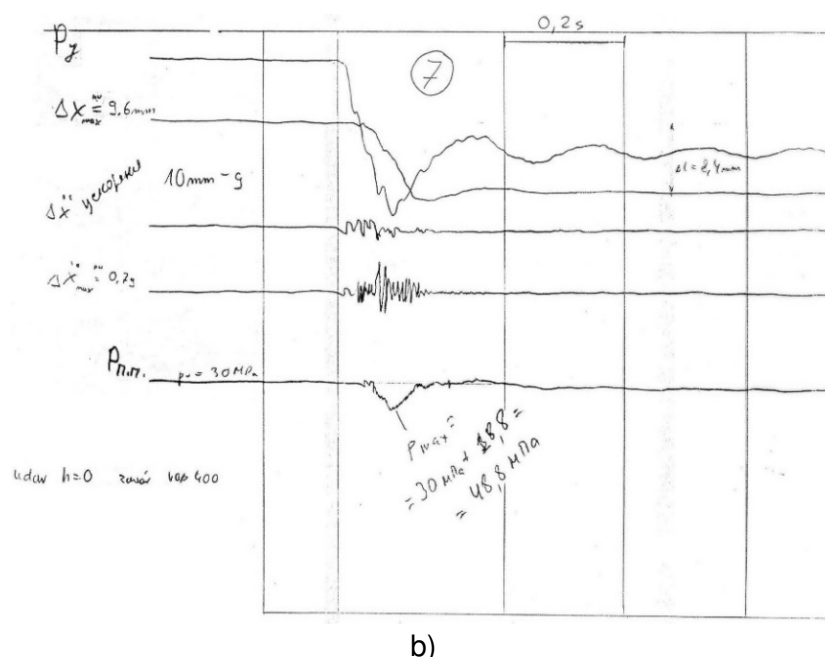


a) b)
Rys. 2.10. Stanowisko do badań dynamicznych udarem masy w TLO Opava (Kasprusz 2007, Szurgacz 2013);
 a) wygląd stanowiska; b) zarejestrowany przebieg ciśnienia w stojaku (stojak dwutelskopowy, średnica I stopnia $\varnothing 0,21$ m, bez zaworu upustowego, $E_u = 0,072$ MJ)

Zarejestrowany przebieg ciśnienia (rys. 2.10 b) charakteryzuje sposób obciążenia stojaka masą której ciężar jest mniejszy od jego podporności. Przebieg pierwszego impulsu zbliżony jest do przebiegu sinusoidalnego w zakresie połowy okresu drgań układu. Z uwagi na brak zaworu hydraulicznego występują odbicia masy udarowej od stojaka do czasu wytlumienia całego przebiegu. Okres drgań układu można ocenić na kilkadziesiąt milisekund.

Przeprowadzone badania stojaka w stanowisku kafarowym w którym ciężar masy udarowej zbliżony był do podporności stojaka przeprowadzono w Instytucie Lotnictwa w Nowosybirsku (Sprawozdanie 1994, Stoiński i inni 2018). Zarejestrowane przebiegi przedstawiono na rysunku 2.11.



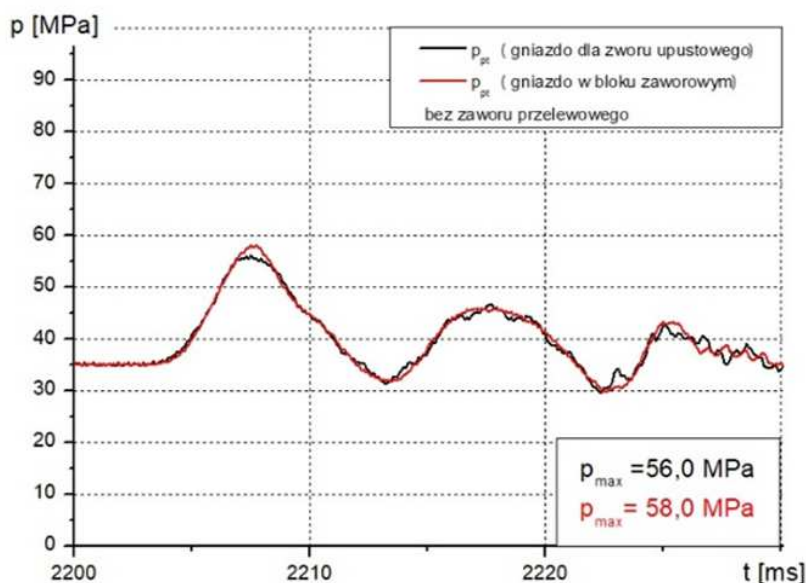


Rys. 2.11. Zarejestrowane przebiegi w badaniu stojaka obciążonego masą o ciężarze zbliżonym do podporności roboczej (stojak jednoteleskopowy o średnicy \varnothing 0,2 m, masa uderowa 100 Mg, zawór hydrauliczny $400 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$) (Sprawozdanie 1994, Stoiński i inni 2018);

a) zarejestrowany przebieg bez zaworu upustowego; b) zarejestrowany przebieg z zaworem upustowym

Zarejestrowany przebieg badanego stojaka bez zaworu ma charakter sinusoidy tłumionej (rys. 2.11 a) o okresie drgań około 300 milisekund. Przyłączenie zaworu skutkowało przejściem w przebieg aperiodyczny (rys. 2.11 b). Zarejestrowany przebieg na rys. 2.11 a) ma podobny charakter do uzyskiwanego analitycznie w ocenie upodatnienia (rys. 2.6 b).

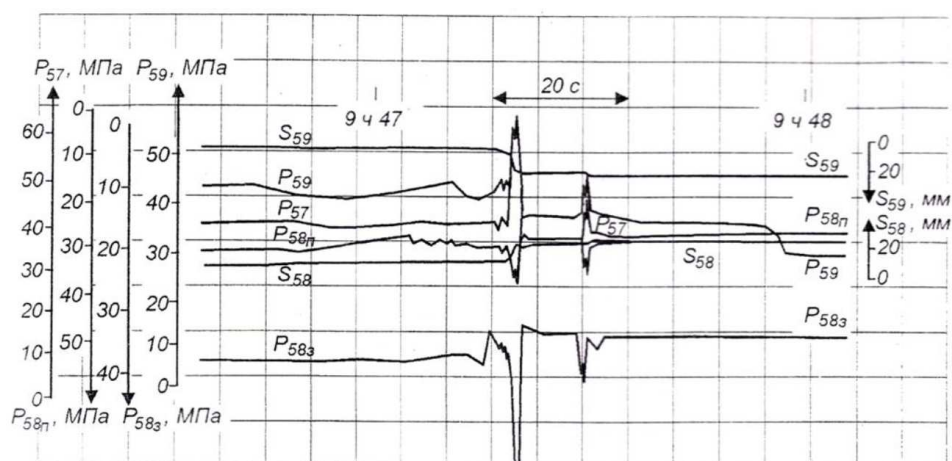
Stanowisko badawcze zlokalizowane w ITG KOMAG obciążenie dynamicznie wytwarza w drodze eksplozji materiału wybuchowego. Na rysunku 2.12 przedstawiono wygląd stanowiska oraz przykładowy zarejestrowany przebieg ciśnienia w badanym stojaku (stojak dwuteleskopowy średnica I/II stopnia 0,32/0,23 m). Przebieg ma charakter sinusoidy tłumionej o okresie drgań około 15 ms. Charakter przebiegu odzwierciedla drgania własne (brak masy zewnętrznej).



Rys. 2.12. Badanie stojaka z wykorzystaniem materiału wybuchowego, bardzo krótki czas obciążenia dynamicznego, w stanowisku ITG KOMAG;
 a) wygląd stanowiska (źródło własne); b) zarejestrowany przebieg ciśnienia (stojak dwuteleskopowy, średnica I stopnia \varnothing 0,32 m) (Centrum Hydrauliki DOH)

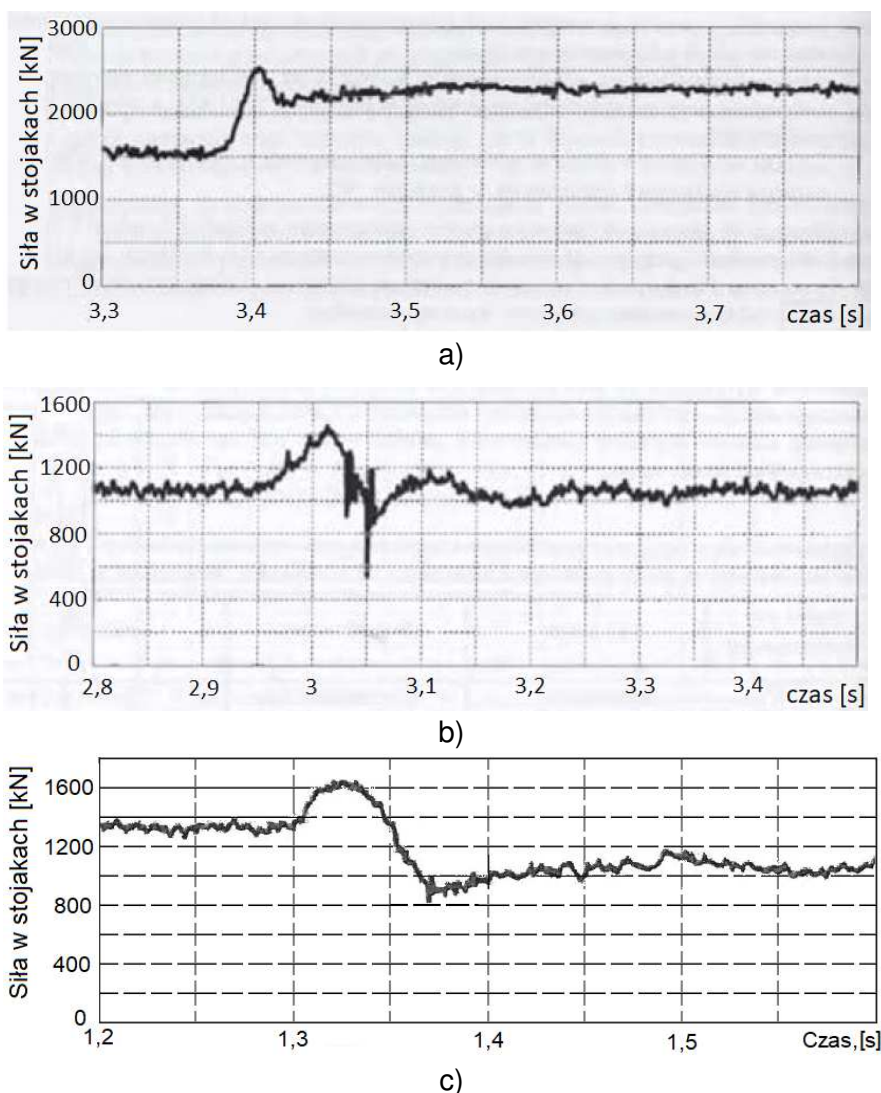
Istotne dla problematyki są badania przeprowadzone w warunkach "in situ", dla przypadków w których występują dynamiczne oddziaływania górotworu na obudowę. Opisany przypadek przez Sheina (2002) obejmuje zarejestrowane podczas tąpnięcia przebiegi opisujące dynamikę w sekcji – rysunek 2.13 oraz szereg interesujących obserwacji parametrów opisujących zarejestrowane tąpnięcie:

- maksymalna prędkość zaciskania wyrobiska - $65 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
- maksymalna prędkość narastania ciśnienia w stojaku - $50 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$,
- okres drgań - $0,2 \div 0,3 \text{ s}$,
- pulsacja układu - $20 \div 30 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 2.13. Zarejestrowane przebiegi wielkości fizycznych sekcji w warunkach tąpnięcia wg badań Sheina (2002)

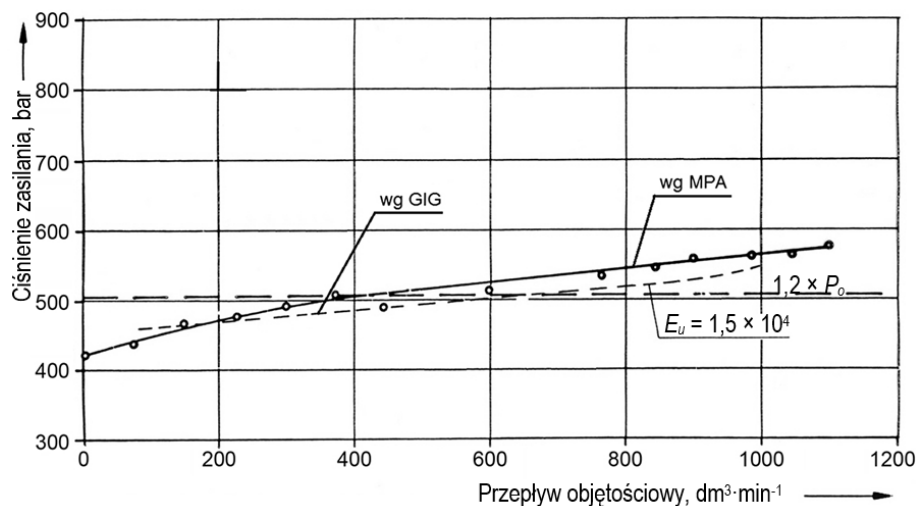
Według badań Szwedy (2004) można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje dynamicznych oddziaływań górotworu na sekcję obudowy. Na rysunku 2.14 przedstawiono wymienione trzy rodzaje oddziaływań według liczności ich występowania. Typ I można przyjąć jako gwałtowne zaciśnięcie wyrobiska, natomiast typ II i III jako obciążenie masą z nadległego pokładu. Charakter przebiegów dynamicznych rejestrowanych sił można odnieść do badań prowadzonych z masą uderową zbliżoną do podporności stojaka (rys. 2.11).



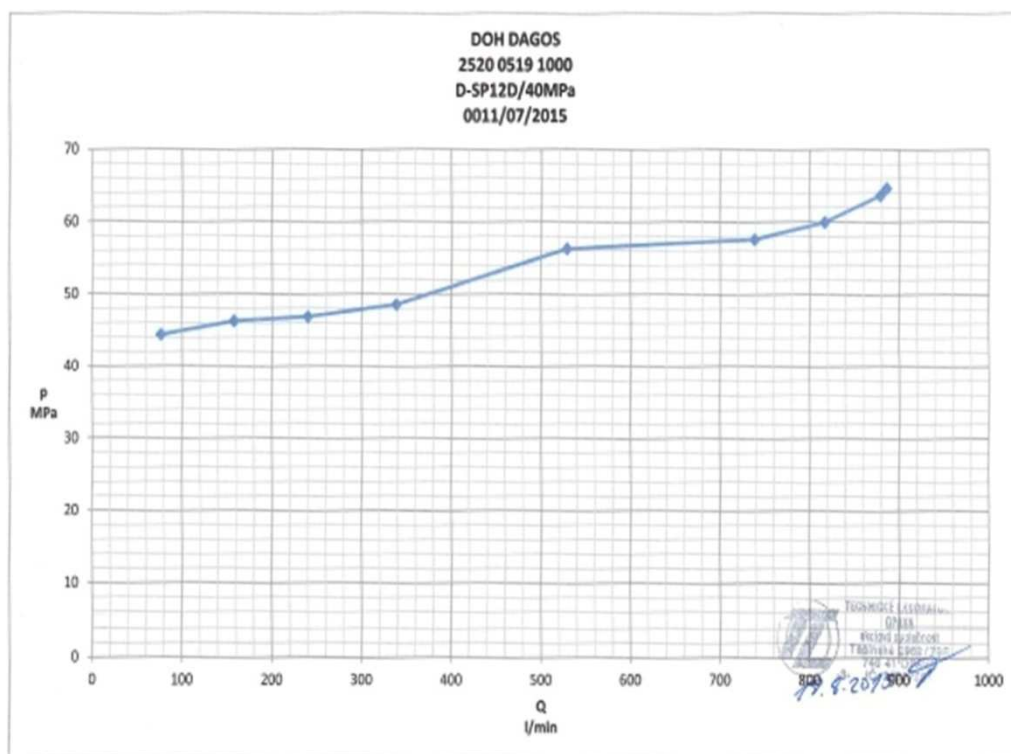
Rys. 2.14. Zarejestrowane przebiegi sił w stojakach sekcji podczas dynamicznych oddziaływań górotworu (Szweda 2004);
a) typ I najliczniejszy; b) typ II; c) typ III

W ocenie upodatnienia jako badania dodatkowe są niezbędne charakterystyki przepływów w zaworach oraz całych układach zabezpieczających stojak przed przeciążeniem. Przepływy wyznacza się w sposób analityczny lub w drodze badań. Aktualnie w drodze badań przepływy wyznacza się w GIG (według procedur własnych)

z wykorzystaniem stanowiska kafarowego, a także w TLO Opava z wykorzystaniem akumulatorów hydraulicznych. Przykładowe charakterystyki przepływów w zaworach wyznaczone w GIG oraz TLO prezentuje rysunek 2.15. Dodatkowo na rysunku 2.15 a) przedstawiono przepływy wyznaczone w prasie Schenck w MPA Dortmund (Stoiński 2000, Stoiński i inni 2018).



a)



b)

Rys. 2.15. Przykładowe charakterystyki przepływów masowych w zaworach hydraulicznych (Stoiński 2000, Stoiński i inni 2018);

a) wyznaczone w GIG - zawór DBV 1325, metodą z wykorzystaniem masy udarowej i prasie szybkiego zsuwu firmy Schenck w MPA Dortmund; b) wyznaczone w TLO Opava dla zaworu SP12, z wykorzystaniem akumulatorów hydraulicznych

2.6. Wnioski z przeglądu literatury

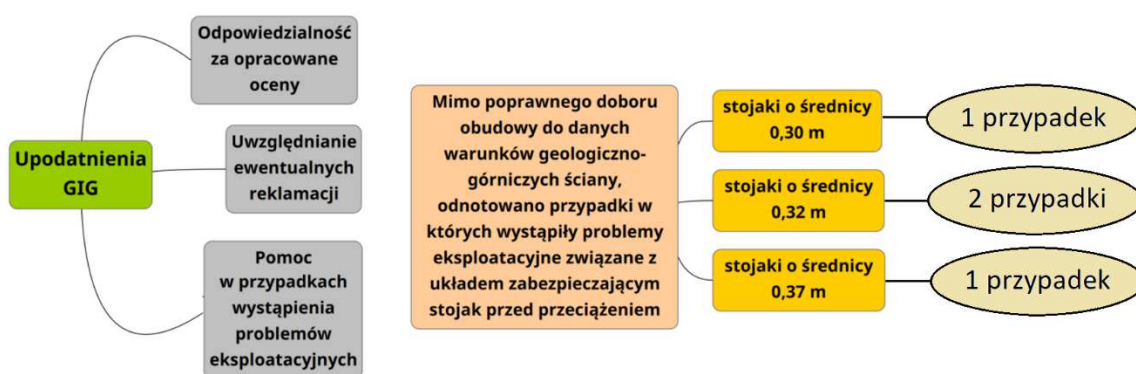
Sekcje zmechanizowanej obudowy ścianowej na rynek są wprowadzane zgodnie z Dyrektywami Parlamentu Europejskiego i zharmonizowanymi z nimi polskimi normami. W zapisach podstawowych zharmonizowanych norm z serii PN EN 1804 wyłączone jest ich obowiązywanie dla przypadku zagrożenia trzęsieniami ziemi, interpretowane jako wstrząs górotworu wywołany działalnością górnictwem. Uzupełnieniem cytowanych norm jest rozporządzenie właściwego ministra w sprawie BHP, dotyczące upodatkowania sekcji przeznaczonych do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. Opinie dotyczące upodatkowania opracowuje GIG w oparciu o dokumenty dostarczone przez zleceniodawcę. W opracowaniu GIG nie są zawarte wymagania dotyczących układów sterowania i zabezpieczenia stojaka przed przeciążeniem, za wyjątkiem przyjętych minimalnych przepływów układu zabezpieczającego stojak. W przypadkach szczególnych np. dla nowych konstrukcji sekcji obudów, czy podczas dokonywania zmian w już wprowadzonych do eksploatacji sekcji, przeprowadza się badania laboratoryjne (dodatkowe) według ustalonej metodyki ze Zleceniodawcą. Badania te są dobrowolne, a wyniki odnoszą się wyłącznie do badanego elementu, według metodyki i wykorzystanego stanowiska.

Pomimo spełnienia przez sekcję obudowy zmechanizowanej wszystkich niezbędnych wymagań oraz przeprowadzonych badań dodatkowych (uzupełniających), wystąpiły, podczas eksploatacji, przypadki uszkodzeń hydrauliki sterującej sekcji ze stojakami o średnicy I stopnia 0,30; 0,32; 0,37 m. Wyjaśnienie przyczyn występowania tych uszkodzeń oraz propozycja ich uniknięcia jest przedmiotem niniejszej rozprawy.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Główny Instytut Górnictwa opracowując opinie dotyczącą upodatnienia zmechanizowanej obudowy ścianowej, do danych warunków geologiczno-górnicznych, bierze pełną odpowiedzialność za opracowane oceny, tak merytoryczne jak również prawnie. Wszelkie zgłaszane reklamacje przez zleceniodawców GIG jest zobowiązany wnikliwie zbadać i udzielić niezbędnej pomocy w ich rozwiązaniu.

Zdarza się, że mimo poprawnej oceny upodatnienia sekcji obudowy zmechanizowanej do danych warunków geologiczno-górnicznych ściany, odnotowuje się przypadki, w których występują problemy eksploatacyjne związane z układem zabezpieczającym stojak przed przeciążeniem. Na rysunku 3.1 ujęto poglądowo tematykę oraz zarejestrowane wymienione przypadki uszkodzeń, które wystąpiły pomimo zachowania przez GIG pełnej staranności w realizacji upodatnienia. Problematyka ich zbadania i opracowania odpowiednich rozwiązań stała się podstawą realizowanej rozprawy doktorskiej.



Rys. 3.1. Poglądowe przedstawienie realizowanej problematyki

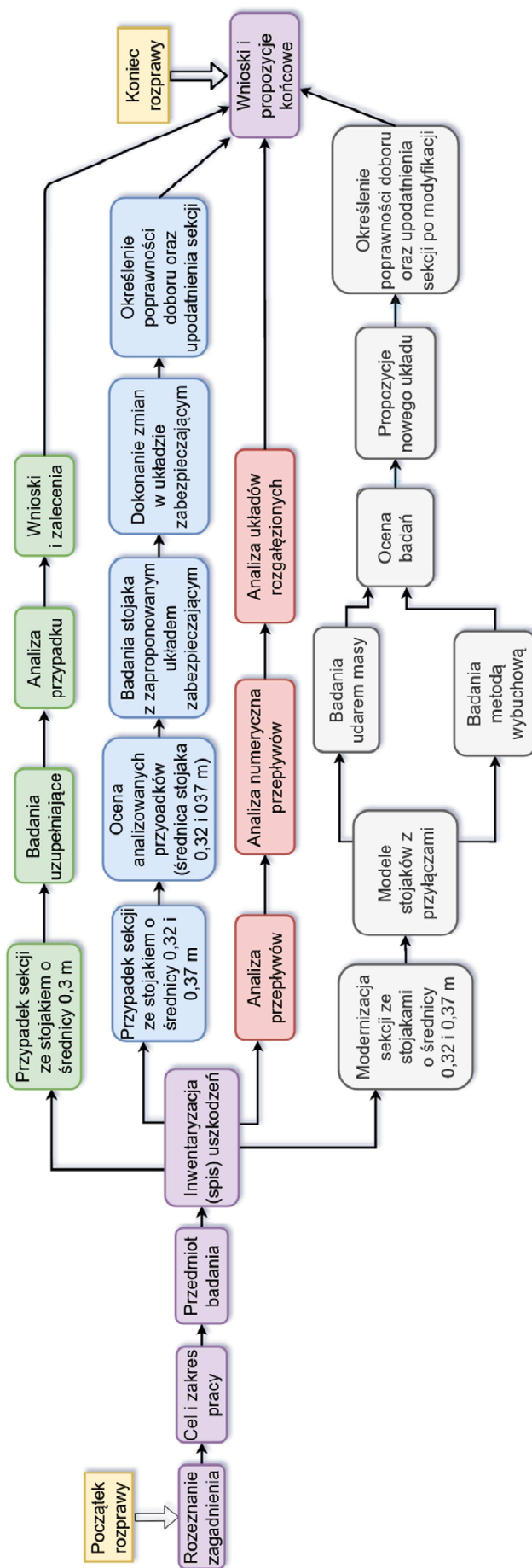
Cel rozprawy doktorskiej przyjęto:

Zapewnienie bezpiecznej eksploatacji sekcji obudowy zmechanizowanej w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu w drodze usprawnień układów zabezpieczających stojak przed przeciążeniem.

Cel użyteczny rozprawy przyjęto:

Doskonalenie metody upodatnienia dla stojaków o dużych średnicach oraz propozycje usprawnień konstrukcji układów zabezpieczających stojak, celem zminimalizowania skutków występowania uderzeń hydraulicznych.

Zakres i sposób realizacji rozprawy przedstawiono na rysunku 3.2 w postaci siatki czynności.



Rys. 3.2. Siatka czynności realizowania rozprawy doktorskiej

4. ANALIZA AKTUALNIE STOSOWANYCH SEKCJI OBUDÓW ZMECHANIZOWANYCH

Analizę przeprowadzono na podstawie prac badawczo-usługowych, zrealizowanych przez Zakład Technologii Eksploatacji, Tępań I Obudów Górniczych w GIG, dotyczących upodatnienia i doboru zmechanizowanych obudów ścianowych, jako realizacji rozporządzenia ministra w sprawie BHP (Rozporządzenie 2016). Analiza objęła okres ostatnich czterech lat tj. 2016-2019 r.

4.1. Przeciążenie sekcji obudowy zmechanizowanej

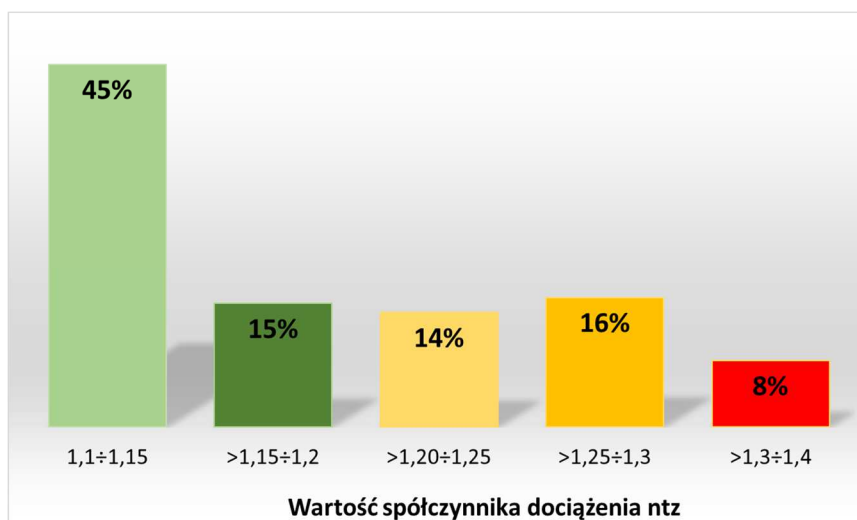
Na podstawie zebranej wiedzy, badań i doświadczeń, do dalszych analiz przyjmuje się, że przeciążenie to przekroczenie chwilowych wartości obciążenia nominalnego, w odniesieniu do przyjętego współczynnika bezpieczeństwa, dla konstrukcji sekcji i jej elementów składowych, wskutek wystąpienia wstrząsu górotworu.

Skutki przeciążenia to przede wszystkim uszkodzenia elementów sekcji obudowy zmechanizowanej i utrata jej funkcjonalności (konstrukcja stalowa, stojaki hydrauliczne oraz hydraulika sterująca) lub zagrożenie ogólnie pojętego bezpieczeństwa eksploatacji (np. niekontrolowany zsuw sekcji w wyrobisku).

Ocena przeciążenia jest dokonywana wg metody GIG jako realizacja rozporządzenia właściwego ministra w zakresie przystosowania sekcji obudów zmechanizowanych do przejmowania obciążeń dynamicznych w drodze upodatnienia (Rozporządzenie 2016). Jej celem jest wyznaczenie bezpiecznego zakresu pracy obudowy oraz dobór zabezpieczeń dla danych warunków geologiczno-górnich, eksploatacyjnych i technicznych sekcji (Rajwa, Prusek, Stoiński 2016).

Wg (Stoiński i inni 2018) zagrożenie wstrząsami górotworu wyrobiska ścianowego prowadzonego systemem zawałowym, na podstawie wartości współczynnika dociążenia n_{tz} określić można wg tabeli 3.2. zamieszczonej w punkcie 3.2 opracowania.

Kształtowanie się współczynnika dociążenia n_{tz} w latach 2016–2019 przedstawiono graficznie na rysunku 4.1. Dane obejmują 266 przypadków ścian prowadzonych w warunkach GZW, analizowanych przez Główny Instytut Górnictwa w ramach wykonywanych prac badawczo-rozwojowych, zleczanych przez kopalnie i producentów obudów, a dotyczących doboru obudowy zmechanizowanej i określenia warunków jej upodatnienia dla danych warunków geologiczno-górnich.



Rys. 4.1. Współczynnik dociążenia n_{tz} w latach 2016-2019 wg GIG (źródło własne)

Z powyższych danych wynika, że 29% wyrobisk ścianowych prowadzonych jest w średnim stopniu zagrożenia wstrząsami górotworu, zaś 8% w silnym stopniu zagrożenia wstrząsami górotworu. Uwzględniając obecne warunki geologiczno-górnice w warunkach GZW oraz wskaźnik dociążenia n_{tz} uznać należy, że udział procentowy ścian prowadzonych w silnym stopniu zagrożenia wstrząsami górotworu będzie się zwiększał.

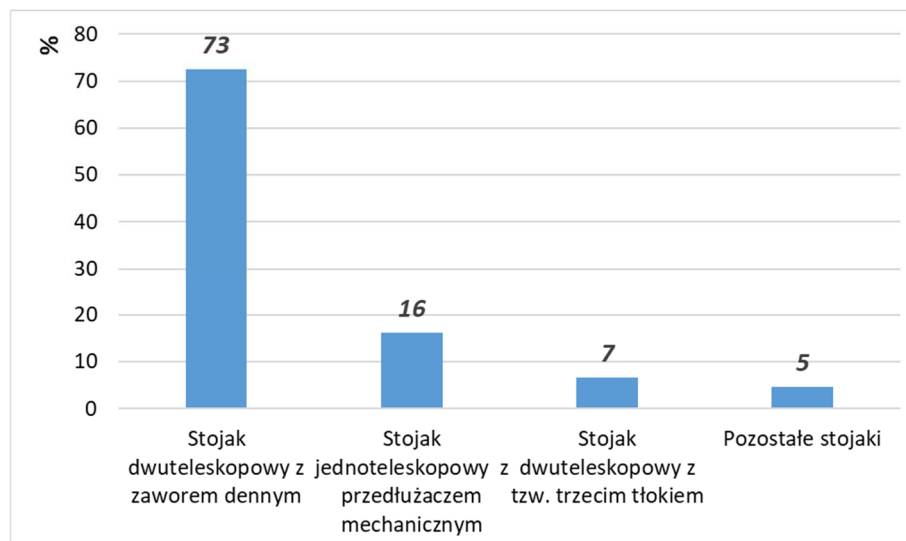
4.2. Parametry eksploatacyjne i techniczne aktualnie stosowanych obudów zmechanizowanych

W latach 2016–2019, Zakład Technologii Eksploatacji, Tąpań i Obudów Górniczych wykonał ponad 550 prac badawczo-rozwojowych realizowanych na zlecenie kopalń oraz przedsiębiorstw górniczych, w tym 266 dotyczących określenia warunków upodatnienia sekcji oraz możliwości jej stosowania w danych warunkach geologiczno-górnich.

Z przeprowadzonej analizy wykonanych opracowań dotyczących warunku stosowania sekcji obudów w pokładach zagrożonych wstrząsami górotworu wynika, że w warunkach GZW najczęściej stosowane są obudowy dwustojakowe, typu podporowo-osłonowego. Obudowy te w przeważającej części analizowanej grupy (aż 73%) wyposażone są w stojaki hydrauliczne dwuteleskopowe z zaworem dennym (rys 4.2).

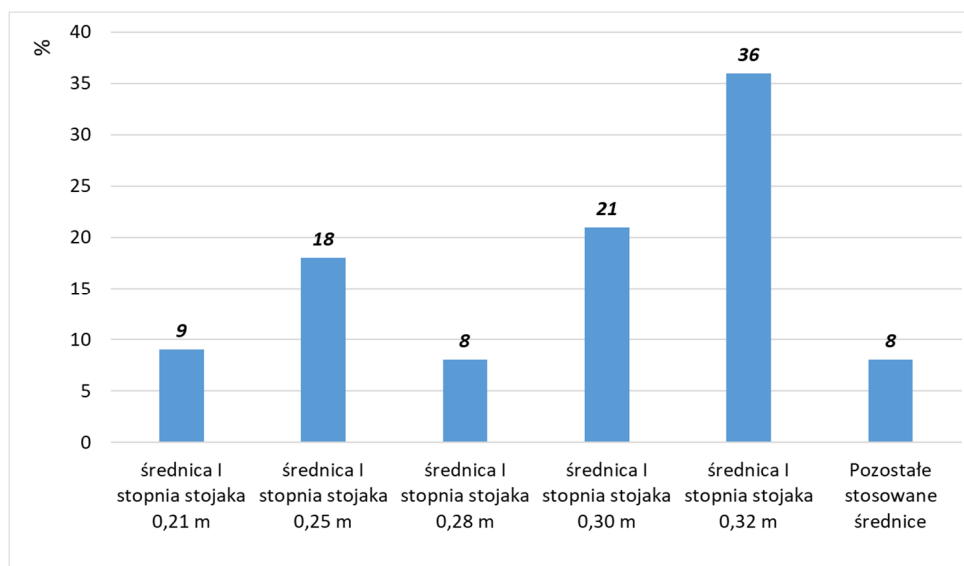
Stojaki hydrauliczne jednoteleskopowe z przedłużaczem mechanicznym są już coraz rzadziej stosowane jednak ciągle stanowią liczną grupę, a ich udział procentowy klasyfikuje je na drugim miejscu i wynosi 16%.

Grupę 7% stanowią stojaki hydrauliczne dwuteleskopowe z tzw. trzecim tłokiem. Pozostałe 5% zajmują stojaki, których udział w całej analizowanej grupie był najmniejszy i zaliczyć do nich można stojaki dwuteleskopowe z zaworem dennym i przedłużaczem mechanicznym/hydraulicznym oraz stojaki z cieczą w tłoczysku.



Rys. 4.2. Procentowy udział stojaków hydraulicznych, różnych typów w analizowanej populacji sekcji zmechanizowanych obudów ściannych w latach 2016-2019 (źródło własne)

Procentowy podział stojaków hydraulicznych dwuteleskopowych ze względu na ich średnicę I stopnia w analizowanym zbiorze przedstawia rysunek 4.3.



Rys. 4.3. Procentowy udział stojaków hydraulicznych dwuteleskopowych ze względu na średnicę I stopnia, analizowanego zbioru (źródło własne)

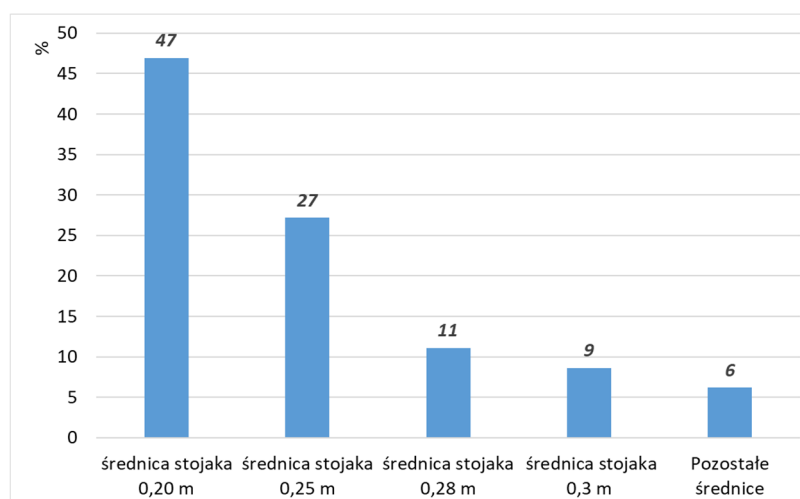
Obecnie najpowszechniej stosowane w obudowach zmechanizowanych (w warunkach GZW) są stojaki hydrauliczne o średnicach I stopnia równych 0,30

i 0,32 m, co związane jest koniecznością uzyskania wysokich parametrów podpornościowych obudowy w stosunku do pogarszających się warunków geologiczno-górnich. Liczną grupę stanowią także stojaki o średnicy I stopnia 0,25 m, co związane jest z remontami wcześniej wyprodukowanych i eksploatowanych obudów.

Obecnie ponad 60% eksploatacji pokładów odbywa się w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, co potwierdza fakt, że Kopalnie coraz częściej zakupują obudowy zmechanizowane ze stojakami o średnicach $\geq 0,30$ m, w celu uzyskania większej podporności obudowy oraz zapewnienia poprawnych warunków utrzymania stropu wyrobiska.

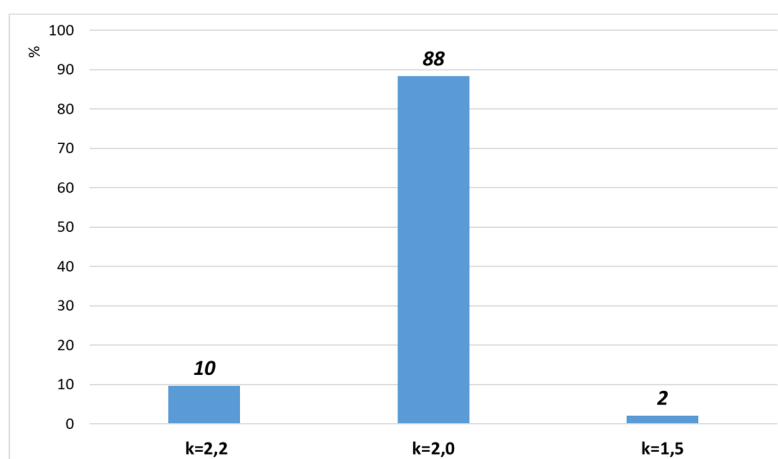
Pozostałe stosowane średnice, które stanowią 8% analizowanych przypadków, to stojaki o średnicach I stopnia rzadko stosowanych tj. \emptyset – 0,255 m; 0,265 m; 0,275 m; 0,29 m (zwykle są to stojaki poremontowe), a także nowych obudów dopiero wprowadzanych na rynek, do których zaliczamy średnice: \emptyset – 0,37 m; 0,38 m; 0,39 m; 0,40 m; 0,42 m. Ze względu na pogarszające się warunki geologiczno-górnice (wzrost obciążenia ze strony górotworu) związane głównie z coraz większą głębokością eksploatacji, szacuje się, że stojaki o średnicach $\geq 0,37$ m będą coraz powszechniej stosowane w przyszłości, a ich udział procentowy znacznie się zwiększy.

W odniesieniu do stojaków hydraulicznych jednoteleskopowych z przedłużaczem mechanicznym najwięcej stosowanych obecnie, w warunkach GZW, jest stojaków o średnicach 0,20 i 0,25 m, co przedstawiono na rysunku 4. 4.



Rys. 4.4. Procentowy udział stojaków hydraulicznych jednoteleskopowych w analizowanym zbiorze ze względu na ich średnicę wewnętrzną (źródło własne)

Procentowy udział stojaków w analizie zbiorczej ze względu na wartość współczynnika przeciążenia w badaniu pełnym (typu) przy wprowadzaniu na rynek przedstawiono na rysunku 4.5.



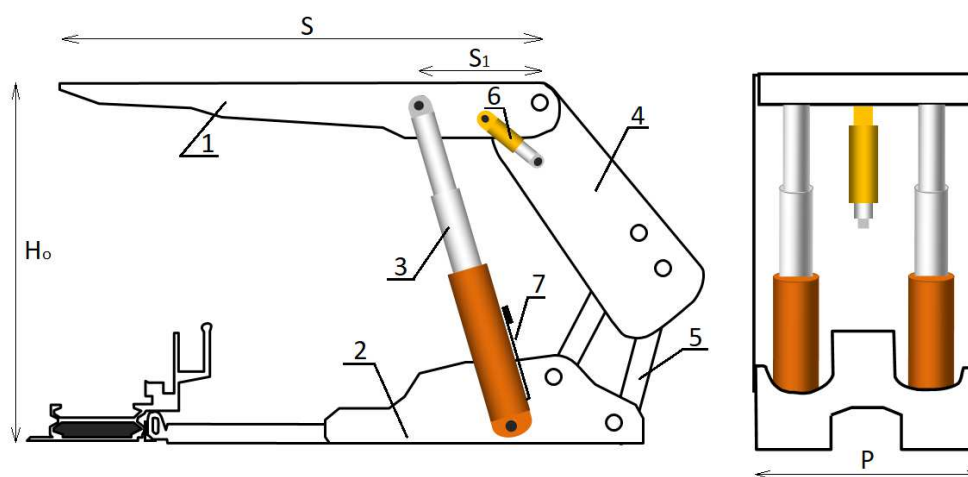
Rys. 4.5. Procentowy udział stojaków obudów zmechanizowanych ze względu na wartość współczynnika przeciążenia w badaniu pełnym (źródło własne)

Jak wynika z dokumentacji techniczno-ruchowych sekcji obudów zmechanizowanych (DTR) ciśnienie zasilania wynosić może od 25,0 do 32,0 MPa. Obecnie ponad 90% wszystkich stosowanych obudów zmechanizowanych stosowanych w GZW zasilana jest ciśnieniem o wartości 25,0 MPa. W poszczególnych przypadkach (przy uwzględnieniu zaleceń zawartych w DTR) sekcje zasilane są ciśnieniem wyższym, co najczęściej wynika z konieczności zapewnienia poprawnych warunków stropowych (wskaźnik „g” $\geq 0,8$).

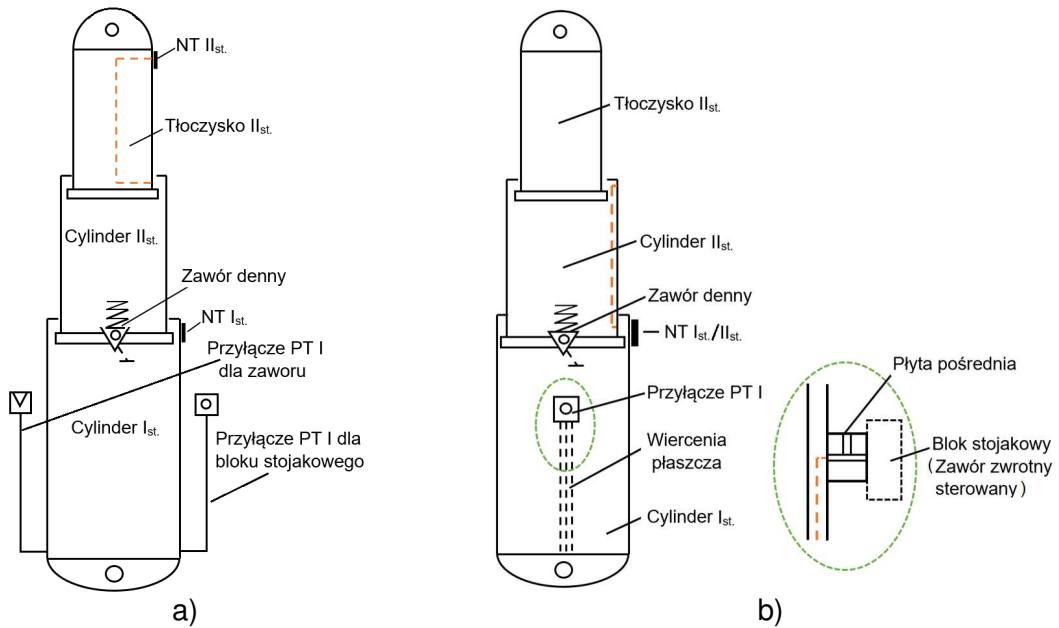
5. PRZEDMIOT BADAANIA

Sekcje zmechanizowanej obudowy ścianowej stanowiące przedmiot niniejszej rozprawy (wybrane przypadki) są typu podporowo-osłonowego, dwustojakowe, o wysokości roboczej od $1,8 \div 2,9$ do $3,1 \div 4,5$ m. Sekcje wymienionego typu stanowią aktualnie ponad 90% populacji eksploatowanych aktualnie w górnictwie węgla kamiennego w Polsce. Będące przedmiotem analizy sekcje wyposażone są w stojaki dwuteleskopowe z zaworem dennym, o średnicy cylindra I stopnia $\varnothing 0,30$ m; $0,32$ m i $0,37$ m. Wyprowadzenie cieczy z przestrzeni roboczej (PT – z podtłoka I stopnia) następuje zewnętrzną rurką w przypadku stojaka o średnicy I stopnia $0,30$ m, natomiast w przypadku stojaków o średnicach I stopnia $\varnothing 0,32$ i $0,37$ m ciecz z przestrzeni roboczej wyprowadzana jest wierceniami w płaszczu cylindra I i II stopnia. Wymienione sekcje posiadają sterowanie przyległe pilotowe.

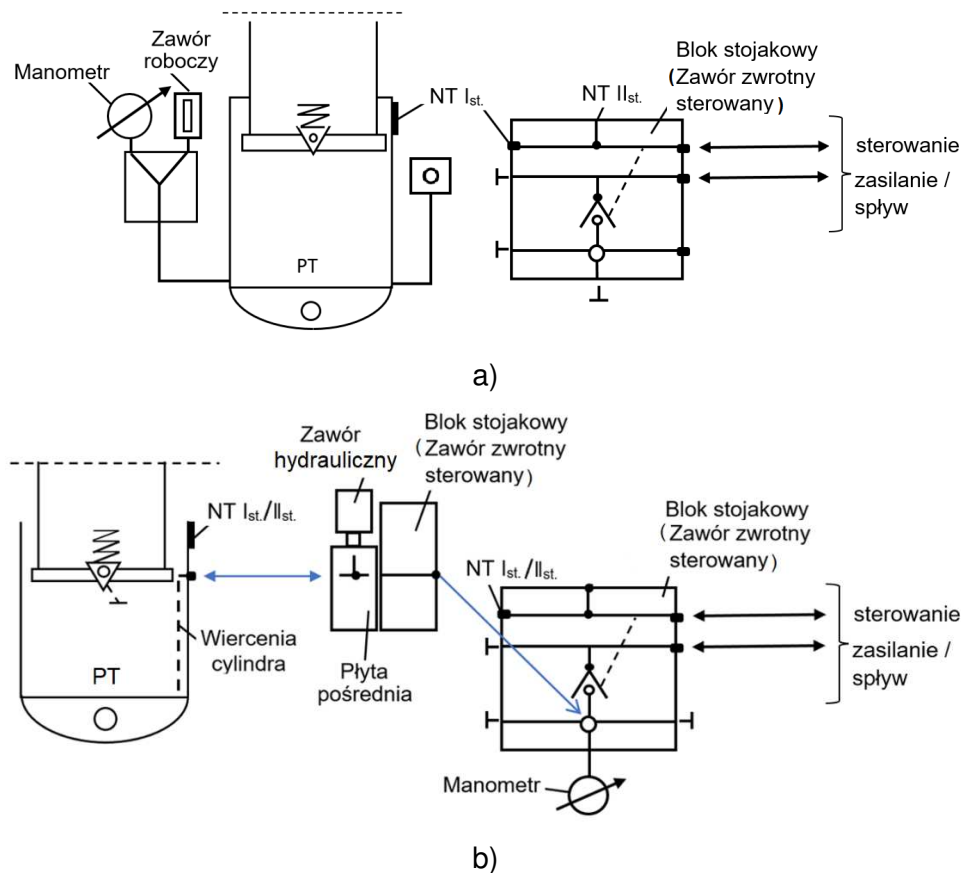
Konstrukcja sekcji, stojaków oraz sterowania jest prezentowana w oparciu o dokumentację Producenta (korzystano z dokumentacji techniczno-ruchowej DTR). Na rysunku 5.1 przedstawiono schematycznie rysunek sekcji, natomiast na rysunkach 5.2 i 5.3 pokazano szczegółowe rysunki stojaków i zastosowanego w nich systemu sterowania.



Rys. 5.1. Schemat poglądowy sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej; gdzie: 1 – stopnica; 2 – spągница; 3 – stojak hydrauliczny; 4 osłona odzawałowa; 5 – ciągnio lemniskaty; 6 – podpora stropnicy; 7 – układ sterowania stojakiem; H_0 – wysokość pracy obudowy; S – długość stropnicy; S_1 – odległość stojaka od końca stropnicy; p – podziałka sekcji



Rys. 5.2. Stojak dwuteleskopowy z zaworem dennym – schemat poglądowy;
 a) stojak o średnicy I stopnia ($I_{st.}$) \varnothing 0,30 m (wyprowadzanie cieczy z przestrzeni roboczej rurką zewnętrzną);
 b) stojak o średnicy I stopnia ($I_{st.}$) \varnothing 0,32 i 0,37 m (wyprowadzanie cieczy z przestrzeni roboczej wierceniach)

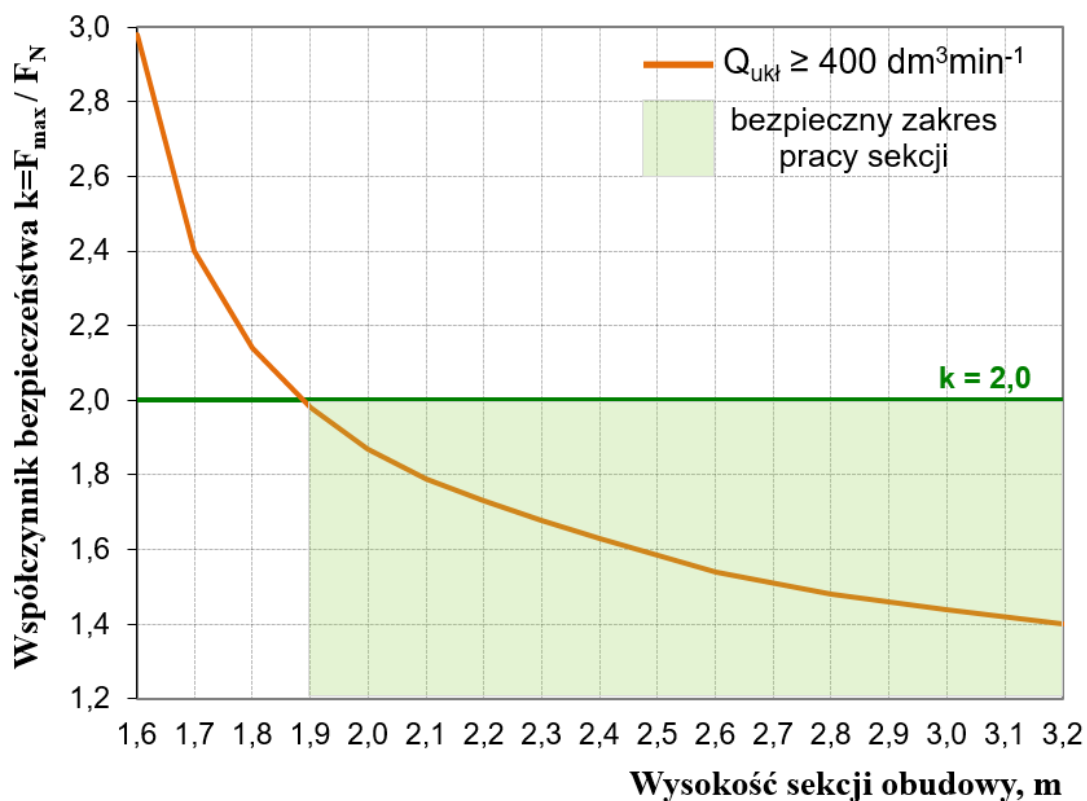


Rys. 5.3. System sterowania stojakiem sekcji obudowy zmechanizowanej;
 a) dla stojaka o średnicy I stopnia ($I_{st.}$) \varnothing 0,30 m, b) dla stojaków o średnicach I stopnia ($I_{st.}$) \varnothing 0,32 i 0,37 m (zawór hydrauliczny, tłoczkowy z dociskiem sprężynowym o przepływie 400 lub 600 $\text{dm}^3\text{min}^{-1}$)

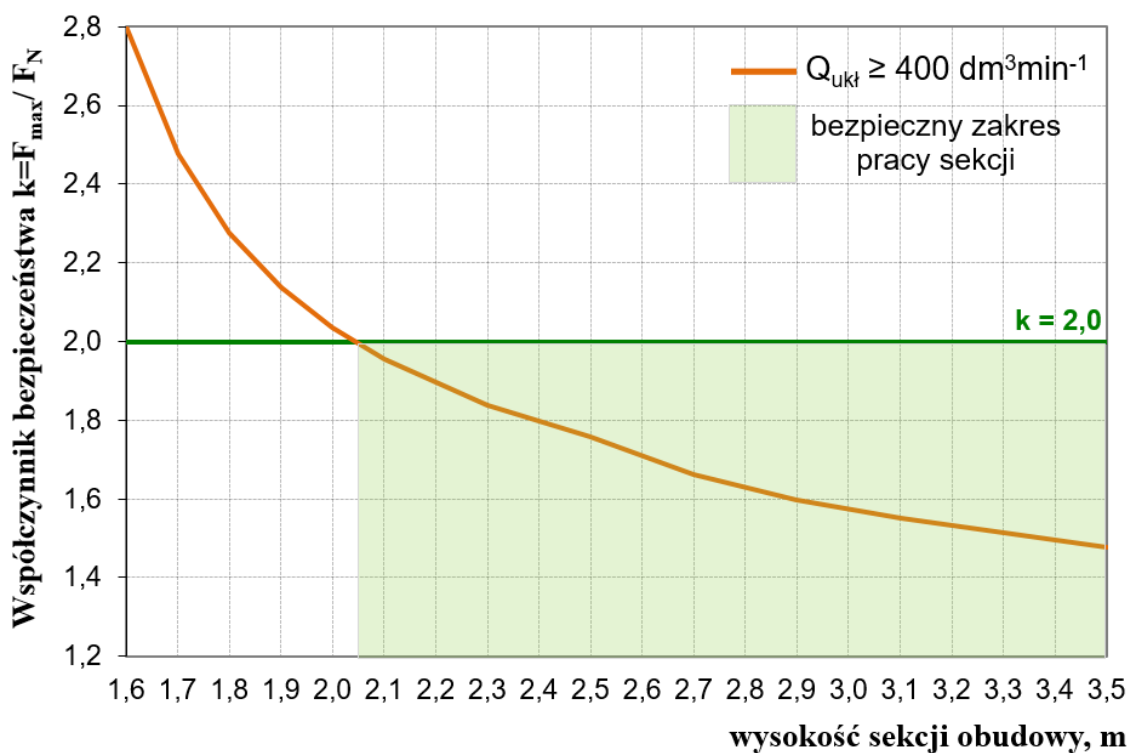
Sekcje zmechanizowanych obudów ścianowych będące przedmiotem analizy zostały wyprodukowane zgodnie ze zharmonizowanymi polskimi normami, posiadały właściwe certyfikaty i zostały wprowadzone do eksploatacji w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, zgodnie z wymaganiami rozporządzenia odpowiedniego ministra do spraw BHP. Podstawowe parametry techniczne sekcji oraz geologiczno-górniczne warunki ich prowadzenia ujęto w tabelicy 5.1, natomiast charakterystyki upodatnienia dla poszczególnych przypadków analizowanych ścian prezentują odpowiednio rysunki 5.4÷5.7.

Tablica 5.1. Podstawowe dane techniczne analizowanych sekcji oraz warunki górniczne ich prowadzenia

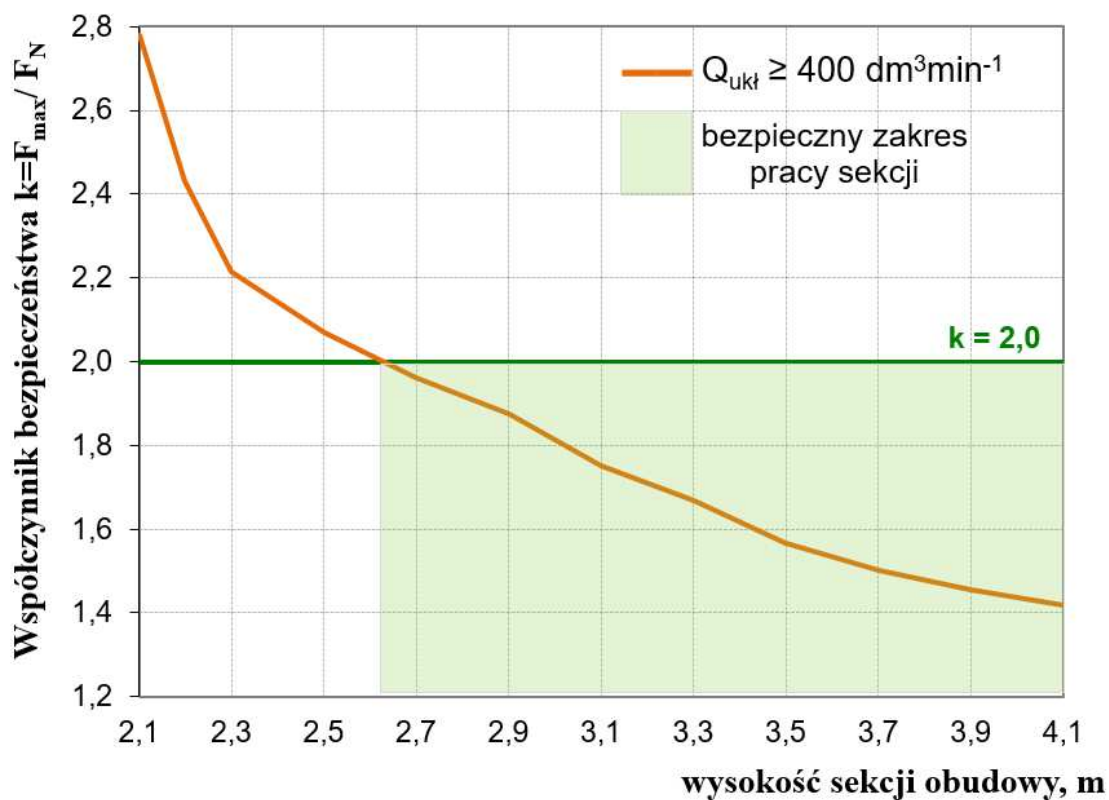
L.p	Parametr	Sekcja I	Sekcja II	Sekcja III	Sekcja IV
1	Ściana nr	1	2	3	4
2	Wysokość geometryczna obudowy, m	1,5-3,2	1,5-3,5	2,0-4,1	2,6-4,6
3	Wysokość robocza obudowy, m	1,8-3,1	1,8-3,4	2,3-4,0	2,9-4,5
4	Podziałka sekcji, m	1,5	1,5	1,5	1,75
5	Średnica cylindra I/II stopnia, m	0,30/0,23	0,32/0,23	0,32/0,23	0,37/0,26
6	Ciśnienie: $P_z/P_r/P_N$, MPa	25/38/38	25/35/35	25/38/38	25/40/45
7	Wiercenia cylindra I stopnia, mm	-	3 x Ø8	3 x Ø8	3 x Ø9
8	Układ zabezpieczający stojak, wg rys.	5.3.a)	5.3.b)	5.3.b)	5.3.b)
9	Przepływ układu zabezpieczającego, $Q_{zab.1,5-Pr}$, dm ³ min ⁻¹	≥400	≥400	≥400	≥600
10	Wskaźnik nośności stropu „g”	0,88-0,95	0,89-0,94	0,88-0,96	>0,8 z półką węglową min. 1,0 m
11	Maksymalna prognozowana energia wstrząsu E_{max} , J	2·10 ⁶	7·10 ⁵	4·10 ⁶	1·10 ⁶
12	Współczynnik dociążenia n_{tz}	1,22	1,28	1,18	1,16
13	Współczynnik przeciążenia stojaka	2,0	2,0	2,0	2,0
14	Charakterystyka upodatnienia	wg rys. 5.4	wg rys. 5.5	wg rys. 5.6	wg rys. 5.7



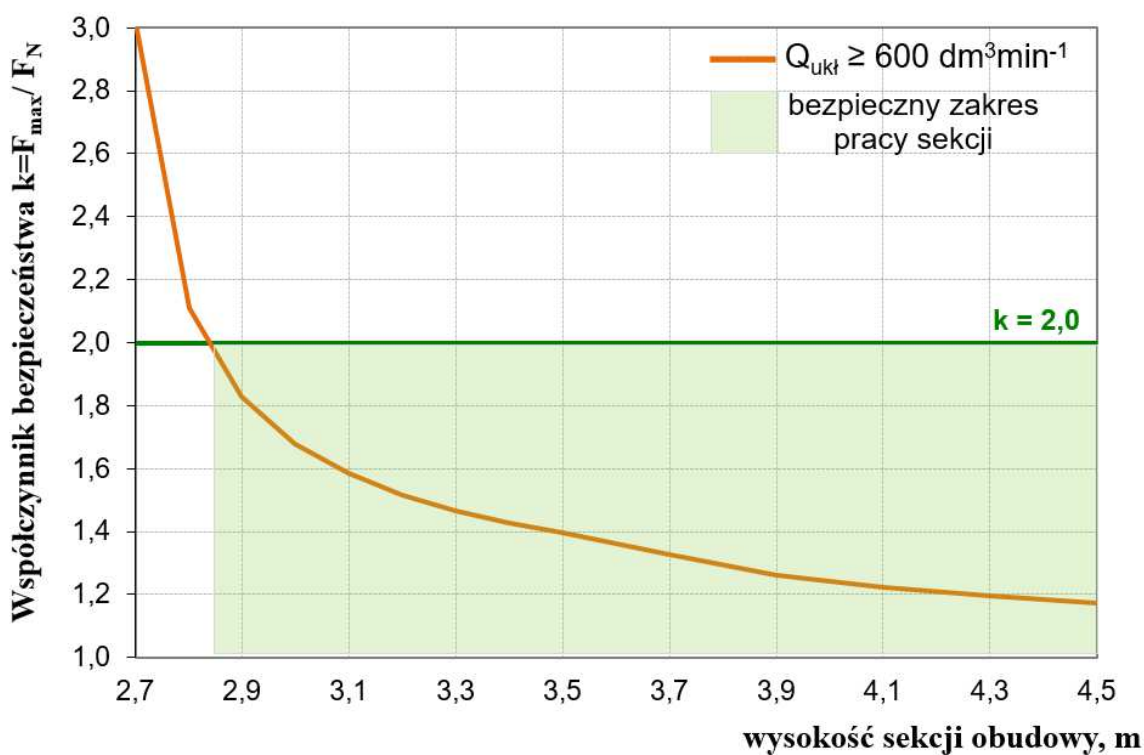
Rys. 5.4. Charakterystyka upodatknienia dla sekcji I, w warunkach ściany 1 według Tablicy 5.1



Rys. 5.5. Charakterystyka upodatknienia dla sekcji II w warunkach ściany 2, według Tablicy 5.1



Rys. 5.6. Charakterystyka upodatknienia dla sekcji III w warunkach ściany 3, według Tabelicy 5.1



Rys. 5.7. Charakterystyka upodatknienia dla sekcji IV w warunkach ściany 4 według Tabelicy 5.1

6. INWENTARYZACJA – SPIS USZKODZEŃ ELEMENTÓW UKŁADÓW STEROWANIA STOJAKÓW HYDRAULICZNYCH ZMECHANIZOWANYCH OBUDÓW ŚCIANOWYCH W WYNIKU WSTRZĄSÓW GÓROTWORU

Przedmiotem inwentaryzacji i identyfikacji uszkodzeń elementów układu hydrauliki sterującej stojaków są sekcje obudów ujęte w rozdziale 5. Zarejestrowane przypadki uszkodzeń powstały w wyniku wstrząsów górotworu, których wartości były niższe od prognozowanych. Uszkodzenia w poszczególnych przypadkach analizowanych obudów różniły się co do ilości oraz stopnia wpływu na poziom zagrożenia bezpieczeństwa w ścianie, natomiast charakter występujących uszkodzeń był podobny. Skutkiem uszkodzeń w każdym przypadku była utrata szczelności w układach podpornościowych stojaka, co w skrajnych przypadkach skutkowało niekontrolowanym zsuwem sekcji (samoczynne zaciśnięcie, wyrabowanie). Niekontrolowany zsuw sekcji w każdym przypadku powodował zatrzymanie postępu ściany, ze względu na utratę stateczności stropu oraz zagrożenie bezpieczeństwa w ścianie. Postój ściany trwał do czasu usunięcia powstałych uszkodzeń.

6.1. Opis uszkodzeń elementów układów sterujących

Uszkodzenia elementów układów sterujących objęły: ciśnieniomierze, zawory hydrauliczne ograniczające ciśnienie robocze stojaka oraz złącza Stecko DN12.

Ciśnieniomierze glicerynowe z rurką Burdona (manometry) o zakresie pomiarowym do 80,0 MPa – fotografia 6.1. Uszkodzenia ciśnieniomierzy występowały głównie w postaci zniszczenia mechanizmu zegarowego i/lub utraty ich szczelności. Otwieranie i zamykanie zaworów w układzie zabezpieczającym stojak może spowodować uderzenie cieczy pod dużym ciśnieniem, skierowane w stronę manometru, co z kolei skutkuje uderzeniem hydraulicznym. Biorąc pod uwagę dane techniczne manometru, należy przyjąć, że występujące w opisywanych przypadkach, nagle wzrosty ciśnienia, których wartości przekraczały zakres pomiarowy manometrów, (80,0 MPa) skutkowały ich nieszczelnością, co związane jest także z pęknięciem rurki Bourdona.



Fot. 6.1. Uszkodzone ciśnieniomierze (źródło własne)

Zawory hydrauliczne ograniczające ciśnienie robocze stojaka - tłoczkowe z uszczelką okrągłą i dociskiem sprężynowym (fot. 6.2). Uszkodzenia występowały głównie w postaci zniszczenia uszczelki okrągłej doszczelniającej tłoczek zaworu, rozerwania tłoczka i/lub uszkodzenia elementów króćca zaworu. Przykładowe uszkodzenia elementów zaworu przedstawiono na fotografii 6.3.



Fot. 6.2. Przykładowy zawór hydrauliczny, tłoczkowy z dociskiem sprężynowym; gdzie: 1 – króciec przyłączeniowy, 2 – tłoczek, 3 – tarcza tłoczka, 4 – sprężyna, 5 – korpus



a)



b)

Fot. 6.3. Przykładowe uszkodzenia zaworów (źródło własne);
a) uszkodzone uszczelki okrągłe zaworu, b) uszkodzone tłoczki oraz króciec zaworu

W celu potwierdzenia właściwego wykonania tłoczka zaworu hydraulicznego (podstawowy element zaworu) poddano jeden z nich analizie składu chemicznego w Laboratorium Zakładu Remontowo-Produkcyjnego PGG. S.A. Przeprowadzona analiza wykazała, że skład chemiczny materiału jest w normie (fot. 6.4). Należy zatem

przyjąć, że prawdopodobną przyczyną uszkodzeń było wystąpienie na wejściu zaworu hydraulicznego ciśnień o wartościach i zmienności przekraczających jego dopuszczalne parametry techniczne. Na podstawie badań zaworów hydraulicznych typu SP stosowanych w układach hydraulicznych (certyfikat oraz badania WE - dokumentacja firmy Dagos Katowice), wartość ciśnień mogących powodować opisane uszkodzenie mechaniczne elementów zaworu wynosiła co najmniej 100,0 MPa.



POLSKA GRUPA
GÓRNICZA
ODDZIAŁ ZAKŁAD REMONTOWO-PRODUKCYJNY
ul. Granitowa 132
43-155 Bieruń

Tel.: 32 7170 301
Fax.: 32 7170 303
Email: zrp@pgg.pl
Homepage: www.pgg.pl
przyrząd pomiarowy: Belec Compact Port S/N 140503

Protokol - analiza składu chemicznego

Probka: Przyłącze Stecko DN 12

Operator: Artur J.

Nr programu : 11

Opis programu : Low alloy steel

Data: 2019-05-13

Wyniki pomiarów:

Nr	C	Si	Mn	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W
1	0,124	0,008	1,570	0,124	<0,003	0,072	0,026	0,077	<0,003	<0,003	0,007	0,023	<0,003
2	0,135	0,007	1,548	0,120	<0,003	0,069	0,024	0,075	<0,003	<0,003	0,006	0,015	<0,003
3	0,126	0,006	1,841	0,107	<0,003	0,068	0,024	0,069	0,004	<0,003	0,004	<0,003	<0,003
4	0,099	0,006	1,593	0,104	<0,003	0,068	0,024	0,065	0,005	<0,003	0,007	<0,003	0,030

Srednie:

C	Si	Mn	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W
0,121	0,007	1,638	0,114	<0,003	0,069	0,024	0,072	0,004	<0,003	0,006	0,010	0,009

Gatunek : 1.0577 S355J2

Uwagi: Zleceniodawca prof. Stoinski

Fot. 6.4. Wyniki badania materiału z którego wykonano złącze Stecko DN12

Złącze Stecko DN12 – Uszkodzenia wystąpiły głównie w postaci ścięcia kołnierza wtyku złącza utrzymującego przetyczkę, co w konsekwencji doprowadziło do wyrwania wtyku wraz z przyłączonym manometrem i utraty szczelności układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem. Uszkodzony wtyk złącza DN12 prezentuje fotografia 6.5.



Fot. 6.5. Uszkodzone złącza Stecko DN12 (źródło własne)

W celu potwierdzenia właściwego wykonania złącza DN 12 poddano go analizie składu chemicznego w Laboratorium Zakładu Remontowo-Produkcyjnego PGG. S.A. Przeprowadzona analiza wykazała, że skład chemiczny materiału jest w normie. Wyniki analizy składu chemicznego przedstawione zostały na fotografii 6.6.



POLSKA GRUPA
GÓRNICZA
ODDZIAŁ ZAKŁAD REMONTOWO-PRODUKCYJNY
ul. Granitowa 132
43-155 Bieruń

Tel.: 32 7170 301
Fax.: 32 7170 303
Email: zrp@pgg.pl
Homepage: www.pgg.pl
przyrząd pomiarowy: Belec Compact Port S/N 140503

Protokół - analiza składu chemicznego

Probka: Element zaworu

Operator: Artur J.

Nr programu : 12

Opis programu : High alloy Cr>4.5%

Data: 2019-05-13

Wyniki pomiarów:

Nr	C	Si	Mn	Cu	Al	Cr.	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Fe.
1	1,002	0,270	0,480	0,275	<0,003	19,92	0,684	0,418	0,018	<0,003	<0,003	0,116	<0,003	76,81
2	0,988	0,268	0,483	0,273	<0,003	19,94	0,675	0,416	0,018	<0,003	<0,003	0,114	<0,003	76,82
3	0,990	0,270	0,487	0,275	<0,003	20,02	0,668	0,418	0,017	<0,003	<0,003	0,116	<0,003	76,74
4	0,989	0,263	0,489	0,276	<0,003	20,03	0,663	0,416	0,016	<0,003	<0,003	0,115	<0,003	76,74
5	0,992	0,271	0,487	0,278	<0,003	20,09	0,668	0,418	0,016	<0,003	<0,003	0,117	<0,003	76,66

Srednie:

C	Si	Mn	Cu	Al	Cr.	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Fe.
0,992	0,268	0,485	0,275	<0,003	20,00	0,672	0,417	0,017	<0,003	<0,003	0,116	<0,003	76,75

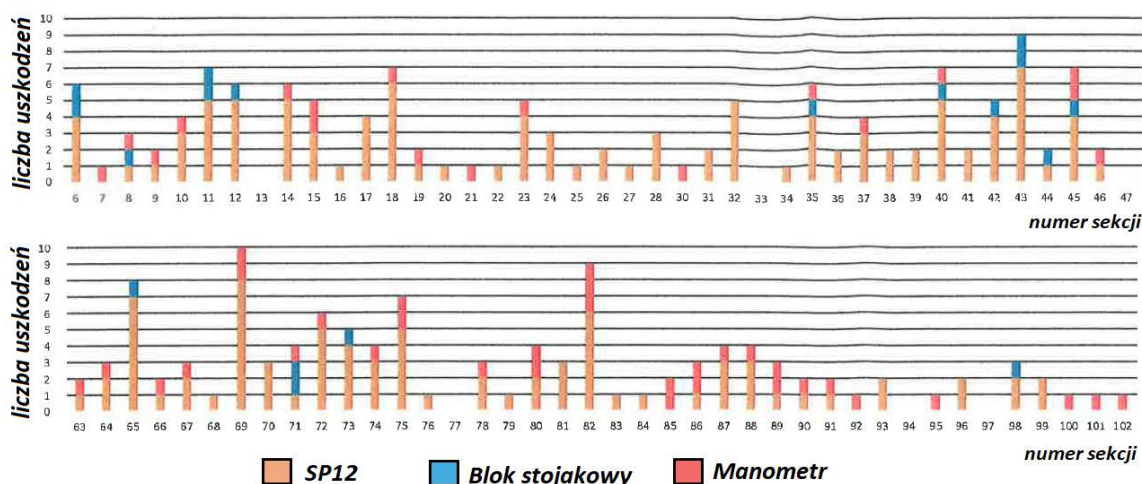
Uwagi: Zleceniodawca prof. Stoinski

Fot. 6.6. Wyniki badania materiału z którego wykonano tłoczek zaworu

Uwzględniając fakt, że według normy PN-G-32000:2011 złącze Stecko DN12 posiada ciśnienie robocze 50,0 MPa, natomiast ciśnienie rozrywające 166,0 MPa, należy przypuszczać, że ciśnienie w układzie zabezpieczającym stojak przekroczyło wartość ciśnienie rozrywającego złącze.

6.2. Podsumowanie przeprowadzonej inwentaryzacji

Największą ilość uszkodzeń elementów układu sterowania stojakiem zarejestrowano w sekcjach w których zastosowany był stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m z wierconymi płaszczami cylindrów. Prowadzona rejestracja, występujących podczas biegu ściany przypadków uszkodzeń, wykazała ich równomierne rozłożenie wzdłuż całej ściany. W tym wyróżnić można przypadki wielokrotnych uszkodzeń elementów układu sterowania w tej samej sekcji obudowy. W okresie czterech miesięcy biegu ściany zarejestrowano ponad 600 przypadków uszkodzeń różnych elementów układu hydrauliki sterującej. Ilość a także charakter tych uszkodzeń był dotychczas niespotykana podczas prowadzenia eksploatacji. Wycinek prowadzonej rejestracji prezentuje rysunek 6.1. Wszystkie rejestrowane uszkodzenia występowały na końcach przyłączy wyprowadzających cieczy z przestrzeni roboczej stojaka PT (podtłokowej), do elementów układu sterowania jak bloki stojakowe, zawory hydrauliczne oraz manometry.



Rys. 6.1. Przykład zarejestrowanych uszkodzeń elementów układu sterowania w ścianie 4 (Centrum Hydrauliki DOH)

Opisane uszkodzenia elementów układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem, wystąpiły w analizowanych przypadkach ścian, pomimo różnych warunków geologiczno-górnicych ich prowadzenia, zastosowania różnych średnic

stojaków i ich parametrów roboczych, zastosowania innych układów sterowania stojakiem oraz wyposażenia tych układów (elementy składowe różnych Producentów). Rodzaj występujących uszkodzeń elementów układów sterujących wskazuje na występowanie dużej zmienności wartości ciśnień cieczy hydraulicznej (oraz prędkości ich narastania) przekraczającej wytrzymałości zastosowanych materiałów. Próby wyjaśnienia przyczyn powstawania wymienionych niekorzystnych zjawisk dynamicznych, w odniesieniu do wymienionych wyżej różnic, odnoszących się głównie do wielkości średnic I stopnia oraz stosowanych układów sterowania, przeprowadzone zostaną w niemiejszej pracy dla dwóch przypadków:

- sekcji ze stojakami o średnicy I stopnia \varnothing 0,30 m, w których ciecz z przestrzeni roboczej stojaka (PT) wyprowadzana jest rurką zewnętrzną, do układu sterującego (Tablica 5.1, Sekcja I),
- sekcji ze stojakami o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 i 0,37 m, w których ciecz z przestrzeni roboczej stojaka (PT) wyprowadzana jest wierceniami w płaszczu cylindra, do układu sterującego (Tablica 5.1, Sekcje II, III i IV).

W wymienionych wyżej przypadkach wystąpiły podobne uszkodzenia elementów układu zabezpieczającego oraz najprawdopodobniej podobna przyczyna. Przyjęty podział pozwoli na przeprowadzenie analiz i wykonanie odpowiednich badań określających warunki pracy stojaka w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, w odniesieniu do zastosowanego w nich schematu układu hydraulicznego. Według przyjętego podziału będą prowadzone dalsze prace w niniejszej rozprawie

7. ANALIZA PRZYPADKU USZKODZEŃ ELEMENTÓW UKŁADU STEROWANIA SEKCJI ZE STOJAKAMI O ŚREDNICY CYLINDRA I STOPNIA \varnothing 0,3 m

7.1. Opis warunków eksploatacyjnych

W trakcie wybierania ściany 1, ze względu na wycienienie eksploatowanego pokładu, sukcesywnie zmniejszana była wysokość prowadzenia ściany z 3,1 m aż do około 2,0 m. Dodatkowo pogorszyły się warunki eksploatacji pokładu, objawiające się powstaniem obwałów w czole ściany. Przy wysokości prowadzenia ściany wynoszącej około 2,0 m, wystąpił wstrząs o energii rzędu 10^5 J. Wstrząs ten nie przekroczył energii prognozowanej dla danej ściany tj. $2 \cdot 10^6$ J ($n_{tz}=1,22$), a mimo to spowodował dynamiczne dociążenie obudów zmechanizowanych, którego skutkiem było:

- uszkodzenie pięciu układów ciśnieniomierzy (ścięcie przyłącza DN12 oraz uszkodzenie mechanizmu zegarowego),
- uszkodzenie zaworów hydraulicznych ograniczających ciśnienie (utrata szczelności),
- obwał skał stropowych.

Wymienione uszkodzenia spowodowały gwałtowny i niekontrolowany zsuw pięciu sekcji obudowy (oparcie stropnic obudowy na przenośniku ścianowym) i zatrzymanie ściany 1, aż do czasu usunięcia uszkodzeń i ustalenia przyczyn ich powstania. Wystąpienie opisanych uszkodzeń nie spowodowało wypadku z udziałem załogi.

7.2. Przyczyny powstawania uszkodzeń

Ustalenie przyczyn powstawania uszkodzeń w układzie sterowania stojakiem, o średnicy I stopnia \varnothing 0,3 m, oparto o analizy samego układu, analizy przepływów cieczy w układzie oraz badań stanowiskowych stojaka z wykorzystaniem udaru masy.

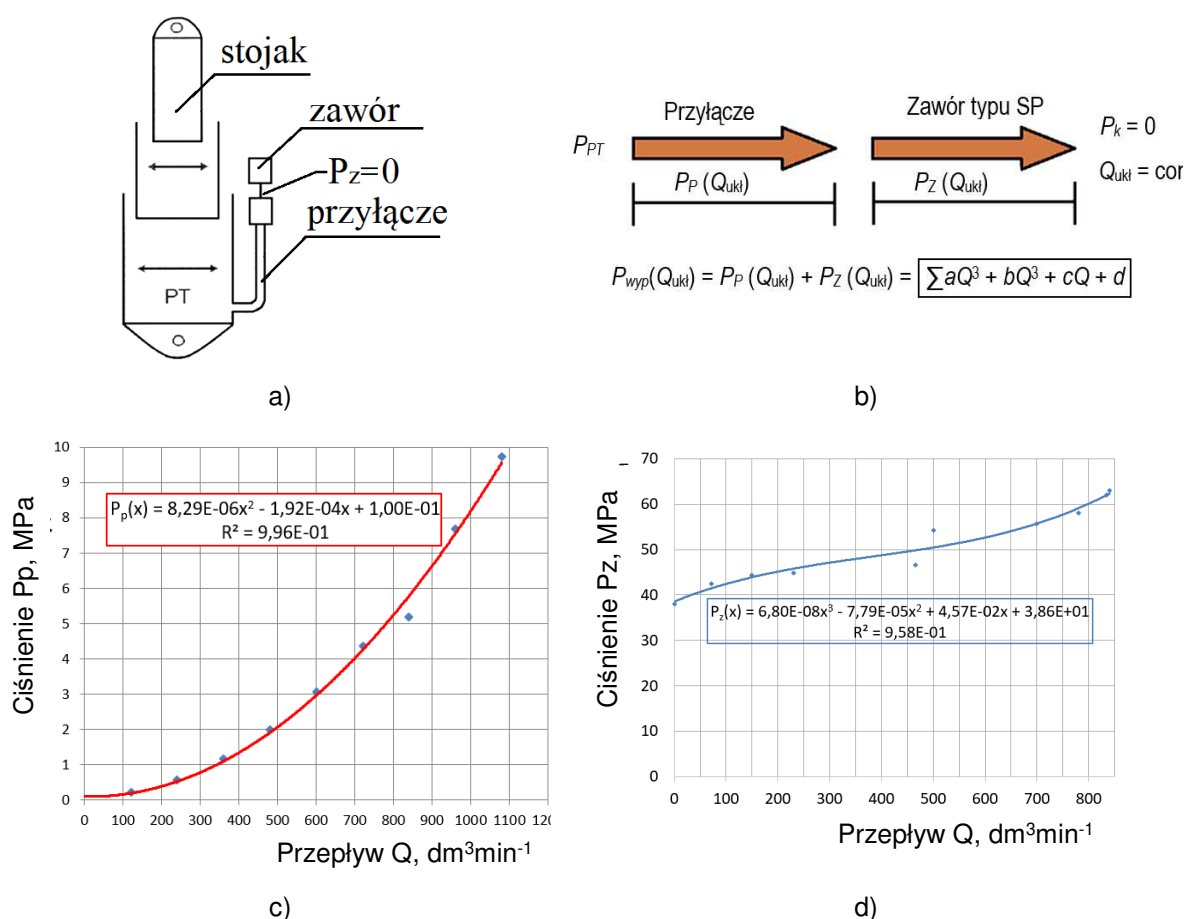
Analiza przepływów w układzie hydraulicznym stojaka.

Przepływy cieczy w układzie hydraulicznym stojaka mają istotny wpływ na ograniczenie przeciążeń sekcji obudowy powstałych w wyniku wstrząsu górotworu. Wartość przepływu wyznacza się dla całego układu obejmującego zawór ograniczający ciśnienie i zastosowane przyłącze, które łączy przestrzeń podtłokową stojaka (PT) z zaworem hydraulicznym. Wartość przepływu cieczy w układzie ma również wpływ na tłumienie drgań w modelu obliczeniowym sekcji, wykorzystywanym do oceny upodatnienia, według metody GIG. Przyjęto, że przepływ układu ograniczającego ciśnienie w stojaku sekcji obciążonej dynamicznie wskutek wstrząsu górotworu,

powinien nie dopuścić do przyrostu ciśnienia ponad 1,5-krotności podporności roboczej/nominalnej. Założenie przyjęto zgodnie z polską normą PN EN 1804-2 (wymagane przeciążenie stojaka obciążonego udarem masy) i zostało zaakceptowane przez Producentów i Użytkowników obudów.

Określając przepływ układu ograniczającego ciśnienie stojaka uwzględnia się rodzaj przyłącza oraz rodzaj zaworu hydraulicznego. Charakterystykę przepływów przyłącza i zaworu przedstawia się w postaci wielomianów wykładniczych, umożliwiając w drodze sumowania opisać przepływ całego układu zabezpieczającego. Przy czym przepływ przyłącza wyznaczany jest w sposób analityczny, natomiast przepływ zaworu hydraulicznego w drodze badań laboratoryjnych.

Przykładowo sposób wyznaczenia przepływu całego układu z wykorzystaniem wielomianów wykładniczych przedstawiono na rysunku 7.1 (Doległo, Gil, Stoiński 2009; Rajwa, Prusek, Stoiński 2016, Stoiński, Doległo 2009; Stoiński i inni 2018).

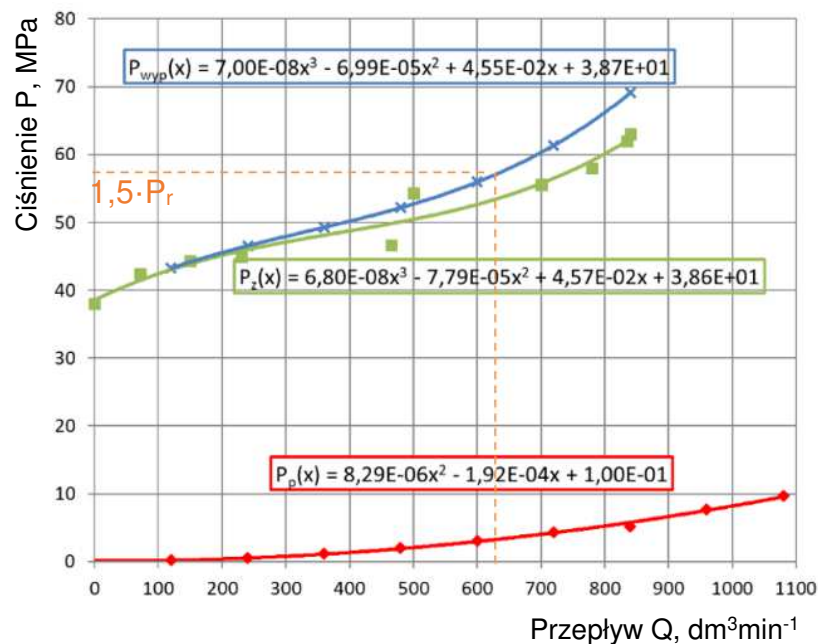


Rys. 7.1. Charakterystyka przepływu układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem i sposób jego wyznaczenia (Stoiński i inni 2018);

a) schemat poglądowy; b) relacje obliczeniowe przepływów; c) charakterystyka przepływu przyłącza $P_p(x)$; d) charakterystyka przepływu zaworu $P_z(x)$;

gdzie: P_{PT} – ciśnienie pod tłokiem; P_P – spadek ciśnienia na przyłączy dla określonego przepływu masowego; Q_{ukt} – przepływ objętościowy układu; P_Z – spadek ciśnienia na zaworze dla określonego przepływu masowego; P_K – ciśnienie na wyjściu z zaworu; Q – przepływ objętościowy; R^2 – współczynnik determinacji (dopasowania)

Charakterystykę przepływu przyłącza wyznaczono wykorzystując program Solidworks, natomiast charakterystyka przepływu zaworu opracowana została na podstawie wyników badań przeprowadzone w TLO Opava, Czechy. Posiadając charakterystykę przepływu przyłącza oraz przepływu zaworu hydraulicznego możliwe było opracowanie charakterystyki przepływu całego układu zabezpieczającego stojak, co pokazano na rysunku 7.2 (Świątek, Szurgacz 2020).



Rys. 7.2. Analiza przepływów dla oceny całego układu zabezpieczającego analizowany przed przeciążeniem dla 1,5-krotności ciśnienia roboczego P_r . ($P_r = 38$ MPa, Q dla $1,5 \cdot P_r = 57$ MPa);

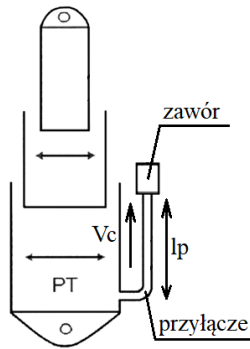
gdzie: P_{wyp} – wypadkowe ciśnienie całego układu dla określonego przepływu masowego

Do obliczeń upodatnienia analizowanej sekcji według metody GIG należy przyjąć przepływ układu 620 dm³min⁻¹ (dla ciśnienia równego 1,5 krotności wartości ciśnienia roboczego), co wynika z analizy przepływów układu według rysunku 7.2.

Prezentowaną analizę wyznaczania całkowitego przepływu układu zabezpieczającego wykorzystuje się również przy projektowaniu stojaków dla potrzeb sekcji przeznaczonych do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu.

Analiza występowania uderów w układzie hydraulicznym stojaka

Analiza układu hydraulicznego wg rysunku 7.3 pod względem występowania w nim uderów hydraulicznych na podstawie literatury (Gryboś 1989, Stoiński, Pytlik, Szymała 2007) pozwoliła na ocenę maksymalnych wartości ciśnień powstających w wyniku zadziałania zaworu zabezpieczającego stojak w układzie hydraulicznym.



Prędkość propagacji fali ciśnieniowej cieczi: $C_c = \sqrt{\frac{B_c}{\rho}}$, ms^{-1}

Prędkość propagacji fali ciśnieniowej cieczi po uwzględnieniu przyłącza: $C_p = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{B_c \cdot D}{E \cdot d}}}$, ms^{-1}

Prędkość cieczi w przyłączu: $V_c = \frac{Q_u}{S_p}$, ms^{-1}

Uderzenie hydrauliczne pełne: $\Delta p = \rho \cdot C_p \cdot V_c$, MPa

Okres fali uderzeniowej: $\vartheta = \frac{2l_p}{C_p}$, s

Rys. 7.3. Sposób i przebieg wyznaczania uderów hydraulicznych w przyłączu zaworu hydraulicznego zabezpieczającego przestrzeń roboczą stojaka; gdzie: B_c – sztywność cieczi (do dalszych obliczeń przyjęto $1,15 \cdot 10^9$ Pa); E – moduł Younga (dla stali przyjęto $2,1 \cdot 10^{11}$ Pa); D – średnica zewnętrzna przyłącza (przyjęto 0,03 m); d – grubość ścianki przyłącza (przyjęto 0,005 m); l_p – długość przyłącza (przyjęto 0,65 m); Q_u – przepływ układu $620 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ dla 1,5 wartości ciśnienia roboczego; S_p – przekrój rurki przyłącza ($\varnothing 0,03/0,02$ m); ρ – gęstość cieczi ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Dla analizowanego przypadku otrzymano następujące wyniki:

Prędkość propagacji fali ciśnieniowej w cieczi: $C_c = 1070 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Prędkość propagacji fali ciśnień w przyłączu: $C_p = 1040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Prędkość cieczi w przyłączu: $V_c = 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Ciśnienie udarowe: $\max \Delta p \cong 33 \text{ MPa}$,

Okres fali uderzeniowej: $\vartheta \cong 1,25 \text{ ms}$.

Maksymalne prognozowane ciśnienie na końcu przyłącza równe jest sumie ciśnienia pod tłokiem stojaka (PT) (ze współczynnikiem przeciążenia 1,5) oraz obliczonego ciśnienia udarowego $\max \Delta p$, i w analizowanym przypadku wyniosło:

$$P_{\max} \cong 38 \cdot 1,5 + 33 \approx 90 \text{ MPa} \quad (7.1.)$$

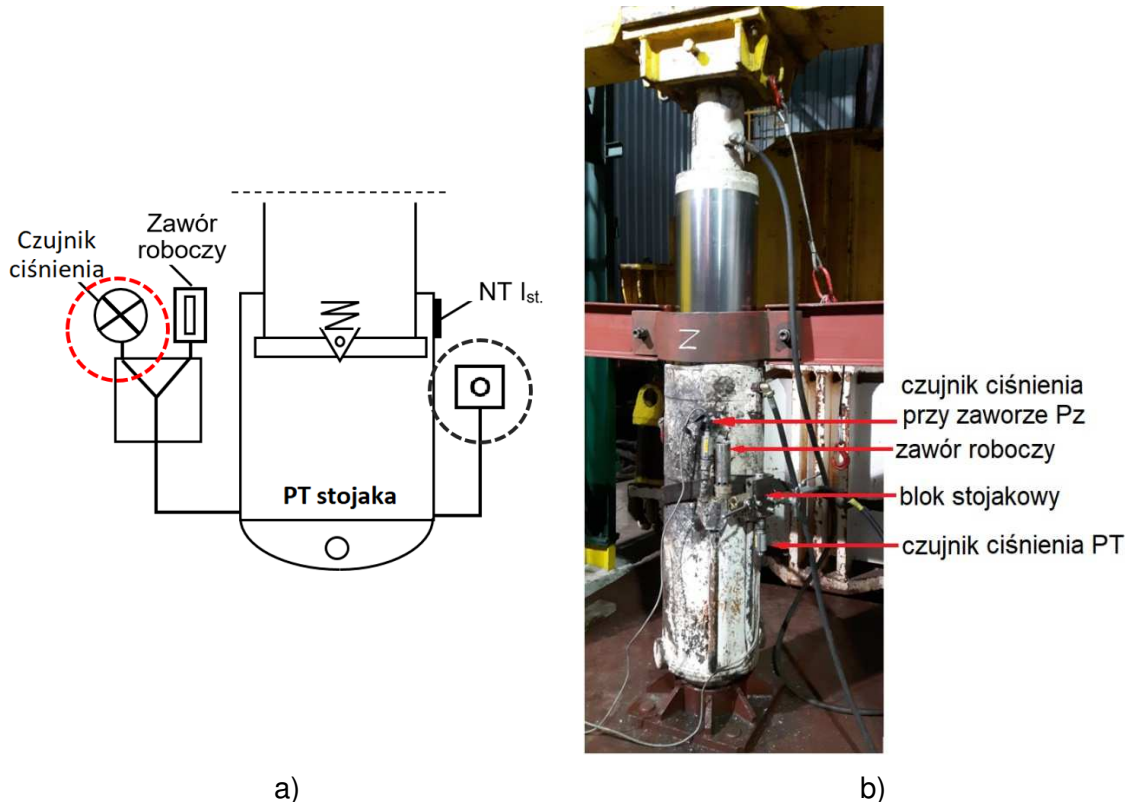
Badania stojaka udarem masy wraz z układem zabezpieczającym

Celem badań było sprawdzenie, jakie ciśnienia powstają w przedmiotowym układzie hydraulicznym zabezpieczającym stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,30 m, podczas próby przeciążenia dynamicznego, zgodnie z procedurą GIG i normą PN-EN 1804-2+A1:2012 (Raport GIG 2018).

Badania przeprowadzone zostały w stanowisku kafarowym znajdującym się w Głównym Instytucie Górnictwa. W stojak dwuteleskopowy o średnicy I stopnia \varnothing 0,30 m, wyposażony w hydrauliczny układ sterowania uderzano masą uderową 20 Mg, swobodnie spadającą z odpowiedniej wysokości, aż do uzyskania przeciążenia dynamicznego równego 1,5-krotności podporności roboczej stojaka. Badania przeprowadzono w dwóch układach:

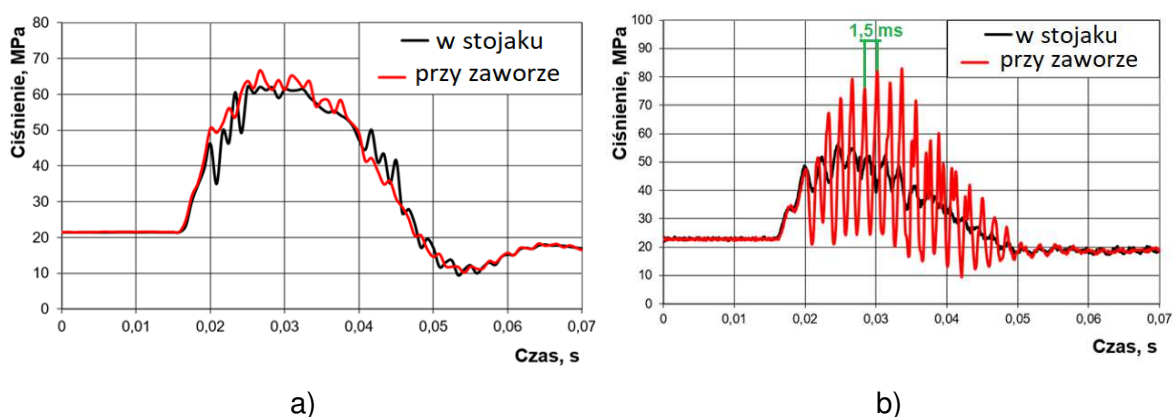
- 1) – wysuw stojaka wynosił około 0,5 m (sumaryczny wysuw hydrauliczny I i II stopnia),
- 2) – wysuw stojaka wynosił około 0,25 m (wysuw hydrauliczny I stopnia).

Schemat badania stojaka z układem sterującym przedstawiono na rysunku 7.4. Natomiast na rysunku 7.5 pokazano przykładowe przebiegi wzrostu wartości ciśnienia w funkcji czasu (Raport GIG 2018).



Rys. 7.4. Badanie udarem masy stojaka wraz z układem sterującym i zabezpieczającym (Raport GIG 2018);

a) schemat układu sterującego i zabezpieczającego stojak, b) wygląd stanowiska



Rys. 7.5. Przykładowe zarejestrowane przebiegi ciśnienia w funkcji czasu (Raport GIG 2018);

a) swobodny spadek masy o ciężarze 20 Mg z wysokości 0,4 m, skok hydrauliczny stojaka 0,5 m; b) swobodny spadek masy o ciężarze 20 Mg z wysokości 0,15 m, skok hydrauliczny stojaka 0,25 m

Przeprowadzone badania pokazują, że przy wysuwie stojaka wynoszącym około 0,5 m podczas badań dynamicznych nie stwierdzono nadmiernego wzrostu ciśnienia w przestrzeni podtłokowej (PT) stojaka oraz przy zaworze hydraulicznym. Przy wysuwie stojaka I stopnia wynoszącym około 0,25 m podczas badań stwierdzono występowanie pulsacji ciśnienia przy zaworze hydraulicznym, o amplitudzie i okresie drgań znacznie większych od wartości ciśnienia mierzonych w przestrzeni podtłokowej. Największe pulsacje ciśnienia, występujące przy zaworze hydraulicznym, o amplitudzie wynoszącej około 82,0 MPa wystąpiły przy zrzucie masy udarowej z wysokości równej 0,15 m. Okres drgań w tym przypadku wynosił około 1,5 ms. Dla porównania przy tej samej wysokości zrzutu masy udarowej, amplituda ciśnienia w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) wynosiła około 53,0 MPa, a okres drgań 60 ms.

Przeprowadzone badania wykazały możliwość występowania wzbudzeń (pulsacji ciśnienia) w układzie hydraulicznym w przypadkach zmniejszania się słupa cieczy pod tłokiem I stopnia stojaka, obciążonego dynamicznie udarem masy. Zbieżność okresów drgań i amplitud ciśnień mierzonych przy zaworze, z wcześniej wykonanymi analitycznie obliczeniami udarów hydraulicznych analizowanego przypadku stojaka hydraulicznego, potwierdzają charakter występujących wzbudzeń układu jako "udary hydrauliczne".

Występowanie pulsacji ciśnienia w układzie to zjawisko wysoce niekorzystne dla bezpiecznej i niezawodnej pracy obudowy, w konsekwencji może powodować zniszczenie bloku stojakowego, zaworu hydraulicznego, manometru oraz uszczelnień hydraulicznego układu sterowania, co miało miejsce w analizowanym przypadku.

Analiza pracy stojaka pod względem jego podporności i upodatnienia

Dla prawidłowo eksploatowanego stojaka dwuteleskopowego z zaworem dennym jego podporność oblicza się z zależności (Rajwa 2004):

- podporność wstępna:

$$F_w = P_{zas.} \cdot S_1, N \quad (7.2)$$

- podporność robocza:

$$F_r = P_{rob.} \cdot S_1, N \quad (7.3)$$

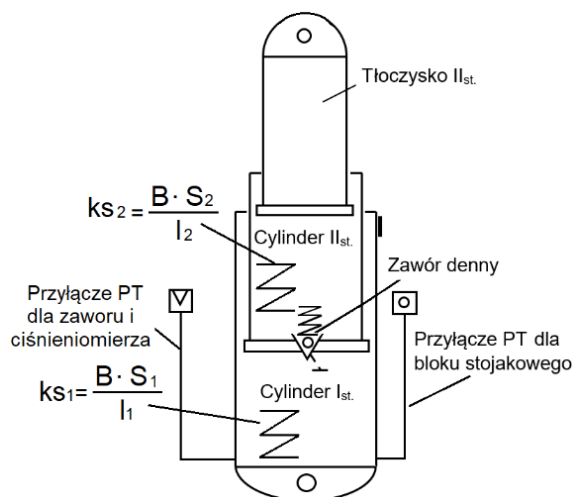
gdzie:

$P_{zas.}$ – ciśnienie zasilnia, *MPa*;

$P_{rob.}$ – ciśnienie robocze, *MPa*;

S_1 – powierzchnia I stopnia stojaka, *m*².

W przypadku pracy stojaka w zakresie przechodzenia z I na II stopień i zaciskania stojaka na II stopniu podane wyżej relacje ulegają zmianie. Następuje zmiana podporności stojaka (spadek z uwagi ma mniejszą średnicę cylindra II stopnia stojaka), zmienia się gwałtownie jego sztywność, co prowadzi często do powstania drgań (pulsacji ciśnienia) w układzie sterowania stojaka, jak również mogą wystąpić utrudnienia w utrzymaniu stropu związane z mniejszą podpornością sekcji. Na rysunku 7.6 przedstawiono schematycznie opisany przypadek.



Rys. 7.6. Praca stojaka w zakresie przechodzenia z I stopnia (I_{st.}) na II stopień (II_{st.}); gdzie: k_{s1} – sztywność I stopnia stojaka, k_{s2} – sztywność II stopnia stojaka, S_1 – powierzchnia I stopnia stojaka, S_2 – powierzchnia II stopnia stojaka, l_1 – długość I stopnia stojaka, l_2 – długość II stopnia stojaka, B – ściśliwość cieczy hydraulicznej

Zgodnie z rysunkiem 7.6 podczas przechodzenia stojaka z I na II stopień następuje niestabilność jego pracy, co można opisać wzorami (Rajwa 2004):

$$F_r = S_2 \cdot P_{rob.} \text{ lub } P_{zas.}^* , N \quad (7.4)$$

* – w zależności od oddziaływania górotworu (zaciskanie, rozpieranie obudowy),

$$F_w = S_1 \cdot P_{wst.} , N \quad (7.5)$$

gdzie:

S_2 – powierzchnia II stopnia, m²;

$P_{rob.}$ – ciśnienie robocze, MPa;

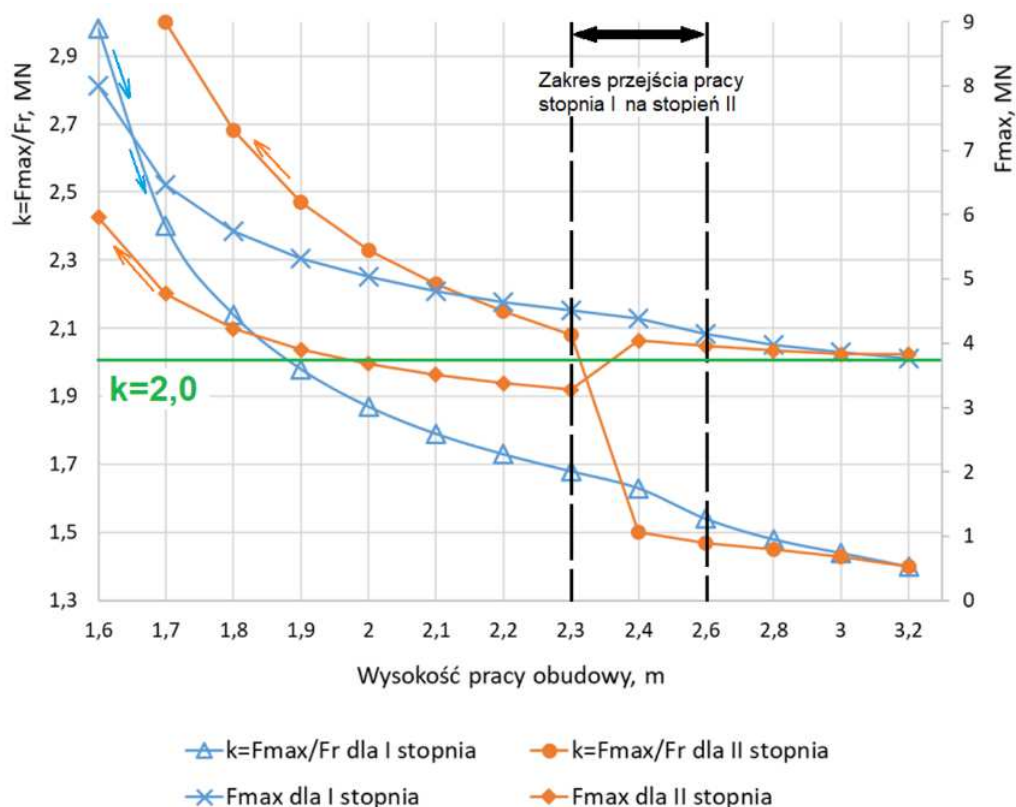
$P_{zas.}$ – ciśnienie zasilania, MPa;

S_1 – powierzchnia I stopnia, m²;

$P_{wst.}$ – ciśnienie wstępne, MPa.

W przypadku całkowitego zsuwu I stopnia stojaka i pracy sekcji w kontakcie ze stropem może wystąpić niestabilna praca stojaka, charakteryzująca się dużą zmiennością podporności wstępnej i roboczej. W najbardziej niekorzystnym przypadku (otwarty zawór denny stojaka) można przyjąć, że podporność wstępna stojaka wynikać może z ciśnienia jego zasilania i powierzchni II stopnia stojaka. Jest to następstwem charakterystyki zaworu dennego (otwarcie przepływu, mechaniczne dla przemieszczenia tłoka I stopnia $1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ m), sprężystości II stopnia stojaka oraz pracy sekcji w kontakcie ze stropem. W związku z tym można wnioskować, że w analizowanym przypadku, gdy stojak nie pracował z odpowiednim wysuwem I stopnia, jego podporność wstępna była znacznie obniżona do wartości wynikających z dokumentacji techniczno-ruchowej. Dla danego przypadku przyjęto, że podpora wstępna analizowanego stojaka, zmalała o ponad 50% w odniesieniu do wartości wynikającej z ciśnienia zasilania i powierzchni I stopnia stojaka (praca prawidłowa). Zmniejszoną podporność wstępną i roboczą uwzględniono w dalszej analizie dotyczącej warunku upodatnienia obudowy.

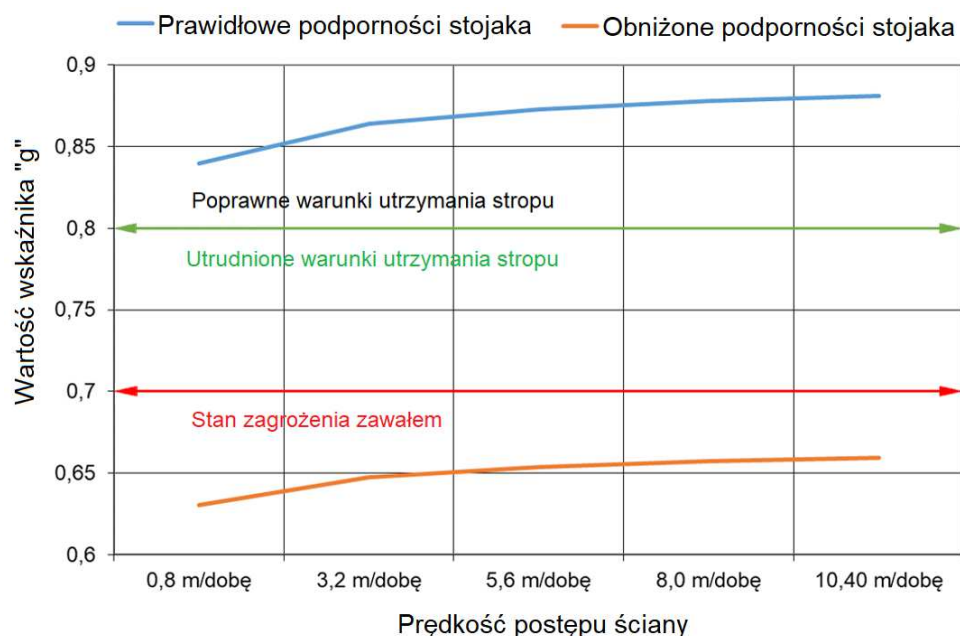
Wykonano także analizę wsteczną upodatnienia sekcji, przyjmując przepustowość układu $400 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$, co przedstawiono na rysunku 7.7 (Stoiński, Gil, Rajwa 2014; Stoiński, Gil 2016; Stoiński i inni 2018, Świątek, Stoiński 2019).



Rys. 7.7. Przewidywane przeciążenia podczas pracy stojaka hydraulicznego na I stopniu oraz podczas pracy przy przechodzeniu z I na II stopień

Jak widać na rysunku 7.7 w przypadku prawidłowej pracy obudowy (podporności stojaka wynikające z I stopnia) jest ona updatniona w zakresie od wysokości 1,9 m, przy zachowaniu słupa cieczy pod tłokiem I stopnia $l_{PTI} \geq 0,42$ m. Podczas nieprawidłowej pracy (brak odpowiedniego wysunięcia I stopnia, obniżone parametry podpornościowe stojaka) obudowa jest updatniona od wysokości 2,35 m, przy utrzymywaniu wysokości słupa cieczy pod tłokiem II stopnia $l_{PTII} \geq 0,78$ m. Generalnie można zauważyć, zgodnie z rysunkiem 7.7, że podczas przechodzenia pracy stojaka z I na II stopień tj. przy wysokości pracy sekcji obudowy 2,3÷2,6 m występuje tzw. obszar zagrożony. Przewiduje się, że w tym przedziale następuje wzbudzenie się całego układu zabezpieczającego, co powoduje występowanie niekorzystnych zjawisk mogących objawiać się w postaci uderów hydraulicznych.

Nieprawidłowa praca stojaka (obniżone parametry podpornościowe stojaka) wpływa także znacząco na warunki utrzymania stropu, co pokazano na rysunku 7.8, przy wykorzystaniu wskaźnika nośności stropu „g”, wg metodyki GiG (Biliński, Kostyk, Prusek 1997; Markowicz, Rajwa, Szweida 2016; Prusek i inni 2016 a, b; Rajwa, Masny, Wrana 2017).



Rys. 7.8. Wskaźnik nośności stropu „g” podczas pracy stojaka na I i II stopniu

Jak można zauważyć przy pracy stojaka hydraulicznego o średnicy I stopnia \varnothing 0,30 m z utrzymaniem odpowiedniego słupa cieczy pod tłokiem I stopnia (około 0,42 m dla analizowanego przypadku) obudowa posiada odpowiednią podporność, aby zapewnić stateczność wyrobiska ścianowego. Wynika to w dużej mierze z podporności stojaka o średnicy I stopnia \varnothing 0,30 m, który w danym przypadku zapewnia wskaźnik „g” $\geq 0,84$. W przypadku, gdy analizowana obudowa pracować będzie nieprawidłowo a podporność wstępna będzie o około 50% niższa, wskaźnik „g” znacząco maleje – „g” $\geq 0,63$, a tym samym występuje stan zagrożenia zawaleniem – co potwierdziło się w warunkach prowadzenia analizowanej ściany (obwały w czole ściany).

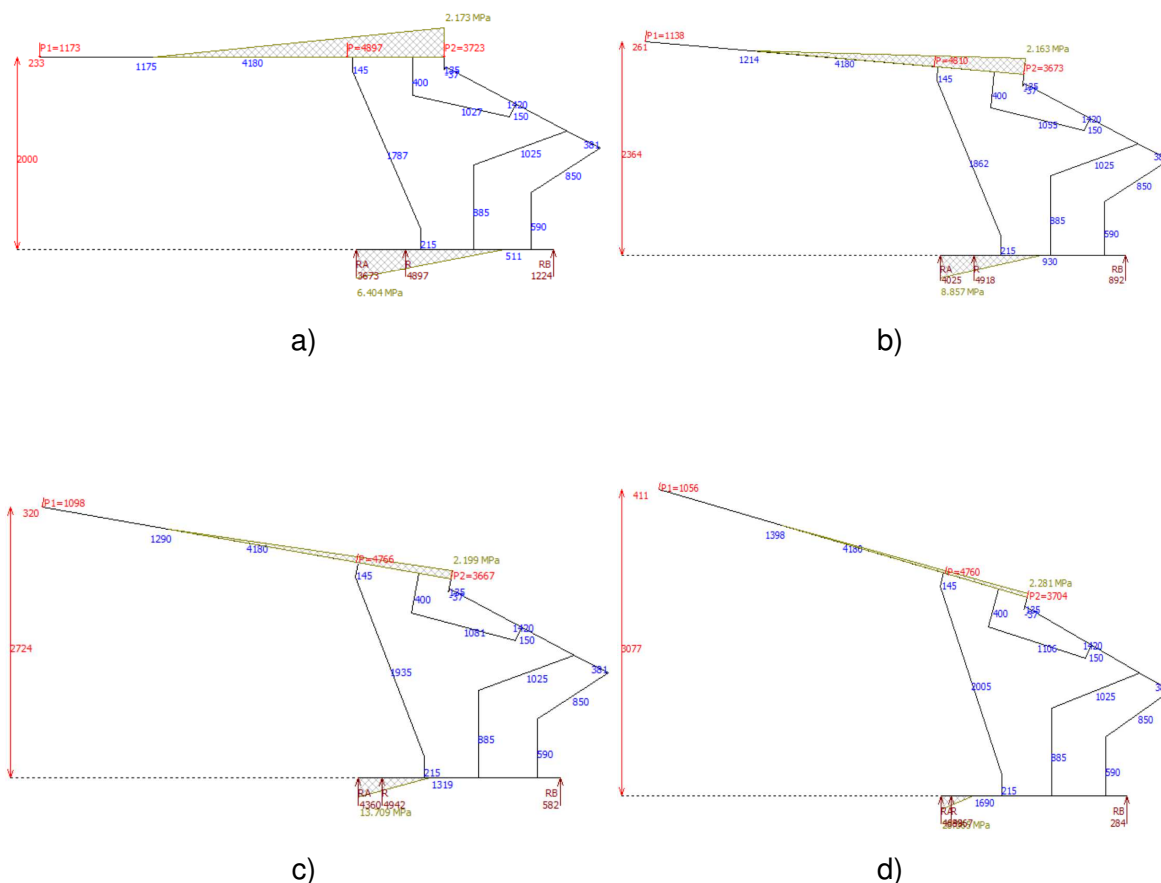
Dodatkowo przyczyną wystąpienia utrudnień podczas prowadzenia analizowanej ściany 1 mogło być niezachowanie prawidłowej geometrii pracy sekcji obudowy (brak równoległości pomiędzy stropnicą i spągnicą – nadmierne podniesienie stropnicy). Podpieranie stropu całą powierzchnią stropnicy jest niezwykle istotne, gdyż liniowe podparcie (np. końcem stropnicy) prowadzić może do niszczenia struktury skał stropowych, a tym samym do utrudnień w prawidłowym prowadzeniu ściany (Prusek, Płonka, Walentek 2016).

Zmianę geometrii pracy sekcji obudowy (nieprawidłowe nachylenie stropnicy względem spągnicy), przedstawiono w tabelicy 7.1 oraz na rysunku 7.9.

Tablica 7.1. Zależności kąta nachylenia stropnicy w odniesieniu do długości oraz kąta nachylenia stojaka

Kąt nachylenia stropnicy względem spągnicy α [°]	Długość stojaka w odniesieniu do kąta nachylenia stropnicy [mm]	Kąt nachylenia stojaka [°]	Odległość pomiędzy końcem stropnicy a spągiem [m]
0	1787	23,38	2,000 ^{*)}
5	1862	22,28	2,364
10	1935	21,10	2,724
15	2005	19,80	3,077

^{*)} wysokość rozparcia sekcji przy jej prawidłowej geometrii



Rys. 7.9. Zmiany wartości i rozkład nacisków wzdłuż stropnicy i spągnicy dla różnych wysokości pracy sekcji obudowy w zależności od kąta nachylenia stropnicy względem spągnicy; gdzie (zgodnie z tabelą 7.1): a) $\alpha = 0^\circ$; b) $\alpha = 5^\circ$; c) $\alpha = 10^\circ$; d) $\alpha = 15^\circ$

7.3. Zalecenia umożliwiające kontynuację eksploatacji w oparciu o przeprowadzone analizy i badania

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz przypadku pracy stojaka o średnicy I stopnia 0,30 m oraz zastosowanym układem zabezpieczającym w którym ciecz z przestrzeni roboczej stojaka wyprowadzana jest rurką zewnętrzną, zaproponowano Kopalni wykonanie odpowiednich czynności pozwalających na dalsze

efektywne i bezpieczne wybieranie ściany 1. Pierwszą czynnością był całkowity zsuw stojaków sekcji obudów zmechanizowanych oraz ponowne ich rozparcie w celu uzyskania prawidłowej pracy stojaków i odpowiedniej podporności sekcji. Aby stojak hydrauliczny pracował prawidłowo należy uzyskać możliwie największy wysuw jego I stopnia. Praca stojaka z odpowiednim wysuwem I stopnia zapewnia uzyskanie odpowiedniej podporności wynikającej ze średnicy cylindra I stopnia, co z kolei pozwala uzyskać poprawne warunki utrzymania stropu w ścianie (wskaźnik „g”>0,8).

Podczas dalszej eksploatacji pokładu zaleca się bezwzględnie przestrzegania zasady zachowania pracy I stopnia stojaka hydraulicznego, jako stopnia roboczego, z uwzględnieniem odpowiedniej ilości cieczy w przestrzeni podtłokowej (PT) stojaka.

Wartość minimalnej wysokości słupa cieczy pod tłokiem I stopnia, określa się w ocenie upodatnienia.

Dodatkowo wymaganie zachowania minimalnego słupa cieczy pod tłokiem I stopnia, wynikające z przeprowadzonych analiz, wprowadzono jako obligatoryjny zapis w ocenie upodatnienia według metody GIG.

Zaznaczyć należy także, że w przypadku zauważenia nieprawidłowej pracy stojaka związanej ze stanem awaryjnym spowodowanym np. uszkodzeniem zaworu dennego, wymaga wymiany stojaka na sprawny technicznie.

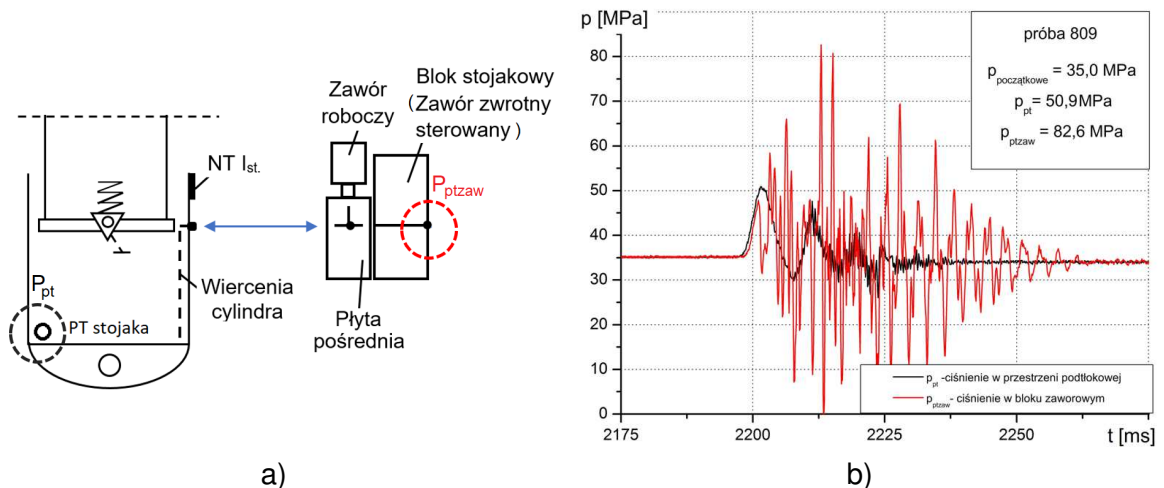
Wprowadzone środki zaradcze w postaci wytycznych dotyczących prawidłowej pracy sekcji obudów, pozwoliły na dalszą bezawaryjną eksploatację pokładu, zapewniając odpowiednie bezpieczeństwo procesu produkcyjnego oraz pracującej w ścianie załogi.

8. ANALIZA PRZYPADKU SEKCJI ZE STOJAKAMI O ŚREDNICY I STOPNIA Ø 0,32 ORAZ Ø 0,37 m

Analizowane obudowy zmechanizowane o średnicach I stopnia Ø 0,32 i 0,37 m, posiadające ten sam układ sterowania stojakiem (rozdział 5 niniejszego opracowania), zostały wprowadzone na rynek i do eksploatacji spełniając wszystkie niezbędne wymagania. Posiadają one stosowne certyfikaty wydane na podstawie badania WE oraz pozytywne opinie dotyczące spełnienia warunków upodatnienia, opracowane przez GIG jako realizacja rozporządzenia odpowiedniego ministra w sprawie BHP. Pomimo to podczas stosowania przedmiotowych obudów wystąpiły bardzo liczne przypadki uszkodzeń elementów układów hydrauliki sterującej, opisane dokładnie w rozdziale 6 pracy. Ilość występujących uszkodzeń oraz ich skutki, przejawiające się w najgorszym przypadku nieprzewidywanym zsuwem sekcji obudów, były przyczyną wstrzymania postępu w trzech ścianach. Przypadki uszkodzeń elementów hydrauliki sterującej wystąpiły szczególnie często w sekcjach ze stojakami dwuteleskopowymi z zaworem dennym o średnicy I stopnia Ø 0,37 m i z wierconymi płaszczyznami cylindrów, przy energiach wstrząsu o wartościach znacznie poniżej maksymalnie prognozowanych. Taki stan rzeczy spowodował konieczność podjęcia natychmiastowych działań, celem utrzymania poprawnych warunków stropowych w ścianie, poprzez zapewnienie odpowiedniej podporności sekcji obudów, a tym samym zapewnienie ogólnie pojętego bezpieczeństwa w ścianie.

W związku z zaistniałą sytuacją Kopalnia w trybie natychmiastowym udostępniła stojak o średnicy I stopnia Ø 0,37 m, z wierconymi płaszczyznami cylindrów, celem przeprowadzenia odpowiednich badań i analiz pozwalających na wyeliminowanie czynników powodujących występowanie uszkodzeń w układzie zabezpieczającym stojak przed przeciążeniem.

W trybie pilnym przeprowadzone zostały badania stojaka (średnica I stopnia Ø 0,37 m) wraz z zastosowanym układem hydraulicznym w stanowisku w ITG KOMAG w Gliwicach, pod obciążeniem dynamicznym z wykorzystaniem materiału wybuchowego. Zarejestrowany przebieg ciśnienia w stojaku przedstawiono oraz schemat pomiarowy pokazano na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Badanie dynamiczne stojaka dwuteleskopowego z zaworem dennym o średnicy I stopnia $\varnothing 0,37 \text{ m}$ z wykorzystaniem materiału wybuchowego (Centrum Hydrauliki DOH); a) schemat pomiarowy, b) zarejestrowany przebieg ciśnienia w stojaku

Według zapisu przedstawionego na rysunku 8.1b) wynika, że w przypadku stojaka o średnicy I stopnia $\varnothing 0,37 \text{ m}$ w którym ciecz z przestrzeni roboczej wyprowadzana jest wierceniami w płaszczu cylindra, występują gwałtowne zmiany pulsacji ciśnienia cieczy w układzie, już przy niewielkich obciążeniach dynamicznych, czego nie obserwowano wcześniej. Największe pulsacje ciśnienia cieczy o amplitudzie wynoszącej $82,6 \text{ MPa}$ wystąpiły w bloku stojakowym, a okres ich drgań wynosił kilka milisekund. Występowanie pulsacji o takiej częstotliwości było prawdopodobnie przyczyną niszczenia bloków stojakowych, manometrów oraz zaworów hydraulicznych. Pulsacji ciśnienia cieczy nie odnotowano w zabezpieczonej przestrzeni roboczej stojaka (PT).

Ponieważ sekcje analizowanych obudów zmechanizowanych zastosowane były w ścianie o dużej efektywności wydobywania, głównym celem przeprowadzonych badań i analiz było usprawnienie układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem, pozwalające na eliminację przyczyn występowania uszkodzeń jego elementów oraz równoczesne wznowienie biegu ściany.

Podjęto decyzję, wspólnie z zainteresowanymi stronami, dokonania zmian w układzie sterowania stojaka oraz zmian parametrów roboczych sekcji, jednocześnie nie naruszając warunków dopuszczenia analizowanej obudowy do eksploatacji.

Ta sama procedura działań podjęta została w odniesieniu do stojaków o średnicy I stopnia $\varnothing 0,32$, ze uwagi na ten sam układ sterowania.

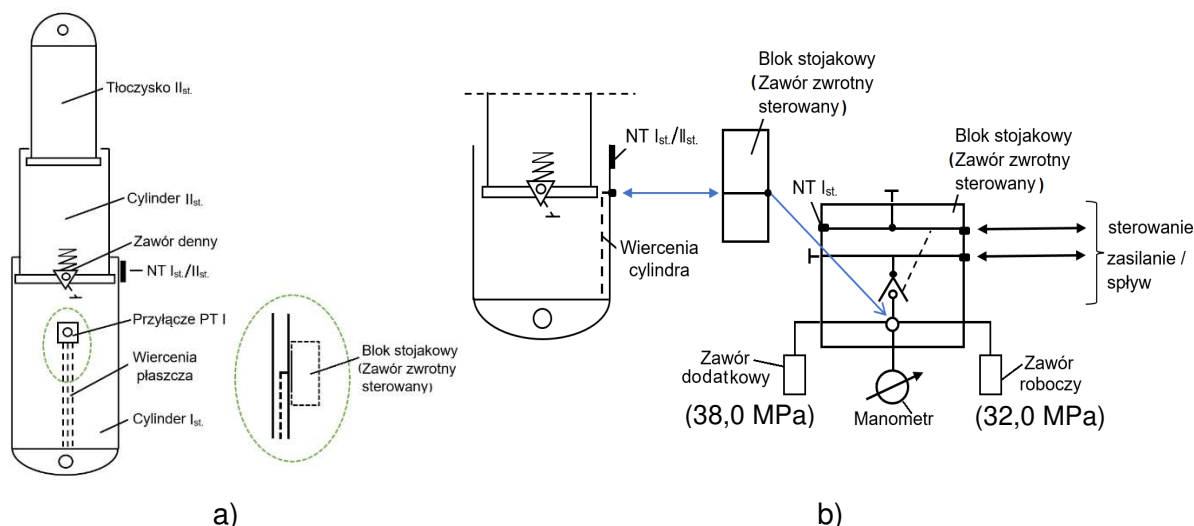
8.1. Wprowadzone zmiany w układzie sterowania stojakiem oraz parametrów roboczych sekcji

Ocena przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analiza budowy układu zabezpieczającego stojaki o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 i 0,37 m w którym ciecz z przestrzeni roboczej wyprowadzana jest wierceniami w płaszczu cylindra, pozwoliła na wprowadzenie odpowiednich zmian w budowie układu, w odniesieniu do układu firmowego. Zmienione zostały także parametry robocze pracy sekcji, przy jednoczesnym uwzględnieniu utrzymania poprawnych warunków stropowych w ścianach (z wykorzystaniem wskaźnika "g").

Wprowadzone zmiany można przedstawić w następujących punktach:

- 1) Dla wszystkich wyżej wymienionych sekcji obudów zmechanizowanych (średnice I stopnia \varnothing 0,32 i 0,37 m) przyjęto zmodyfikowane ciśnienia robocze. Przyjęto, że w obydwu przypadkach stojaków podporność robocza wynosić będzie maksymalnie $P_r = 32,0$ MPa. Ciśnienie zostało obniżone odpowiednio o 3,0 MPa dla sekcji II, 6,0 MPa dla sekcji III i 8,0 MPa dla sekcji IV, zgodnie z tablicą 5.1. Podporność wstępna wszystkich sekcji, zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową obudów pozostała bez zmian i wynosi $P_w = 25,0$ MPa.
- 2) We wszystkich układach zabezpieczających wymontowano płytę pośrednią znajdującą się pomiędzy stojakiem a blokiem stojakowym.
- 3) Do bloku stojakowego podłączono dwa zawory hydrauliczne, z których jeden pełni rolę zaworu roboczego, zaś drugi zaworu dodatkowego. Nastawy zaworów powinny wynosić odpowiednio: zawór roboczy 32,0 MPa, zawór dodatkowy 38,0 MPa (zgodnie z normą PN EN nastawa zaworu dodatkowego powinna być wyższa od nastawy zaworu roboczego o około 10÷15%).
- 4) Dla stojaków o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m zastosowano zawory SP7 – zawór roboczy oraz SP10 – zawór dodatkowy (zawory firmy Centrum Hydrauliki DOH). Przepływ objętościowy układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem, na podstawie badań przepływów zaworów, z uwzględnieniem różnych ciśnień otwarcia oraz strat na dopływie, oceniono dla potrzeb upodatkowania na $250 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$.
- 5) Dla stojaków o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m zastosowano dwa zawory SP10 nastawione na ciśnienie odpowiednio: zawór roboczy SP10 z ciśnieniem nastawy 32,0 MPa i zawór dodatkowy SP10 z ciśnieniem nastawy 38,0 MPa. Przepływ objętościowy układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem, na podstawie badań przepływów zaworów, z uwzględnieniem różnych ciśnień otwarcia oraz strat na dopływie, oceniono dla potrzeb upodatkowania na $350 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$.

Dokonane zmiany przedstawiono graficznie na rysunku 8.2.

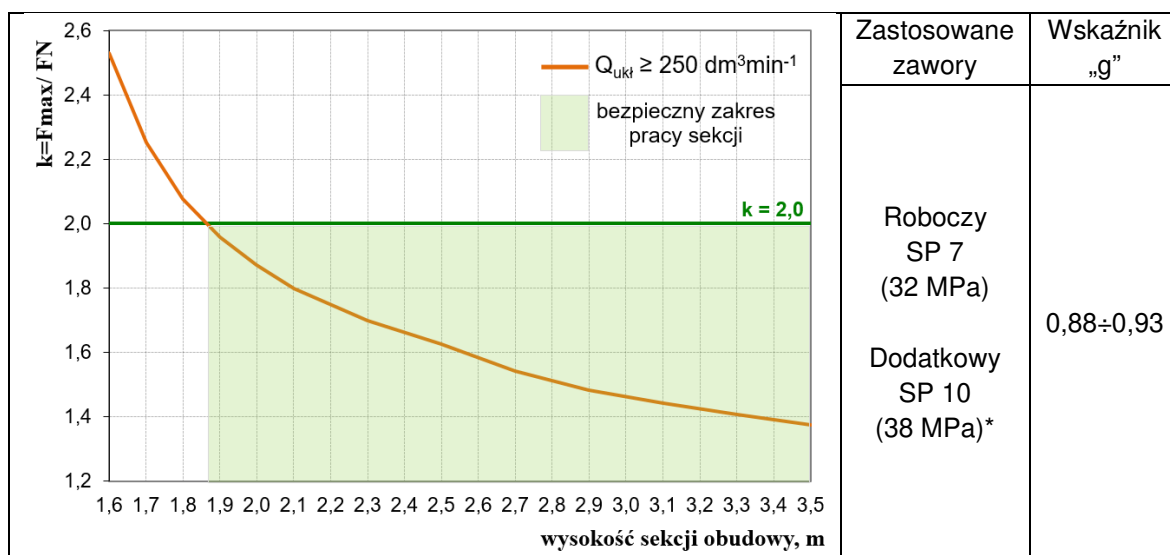


Rys. 8.2. Układ hydrauliczny sekcji ze stojakami \varnothing 0,32 oraz \varnothing 0,37 m po dokonanych zmianach;

a) schemat stojaka, b) schemat układu sterującego

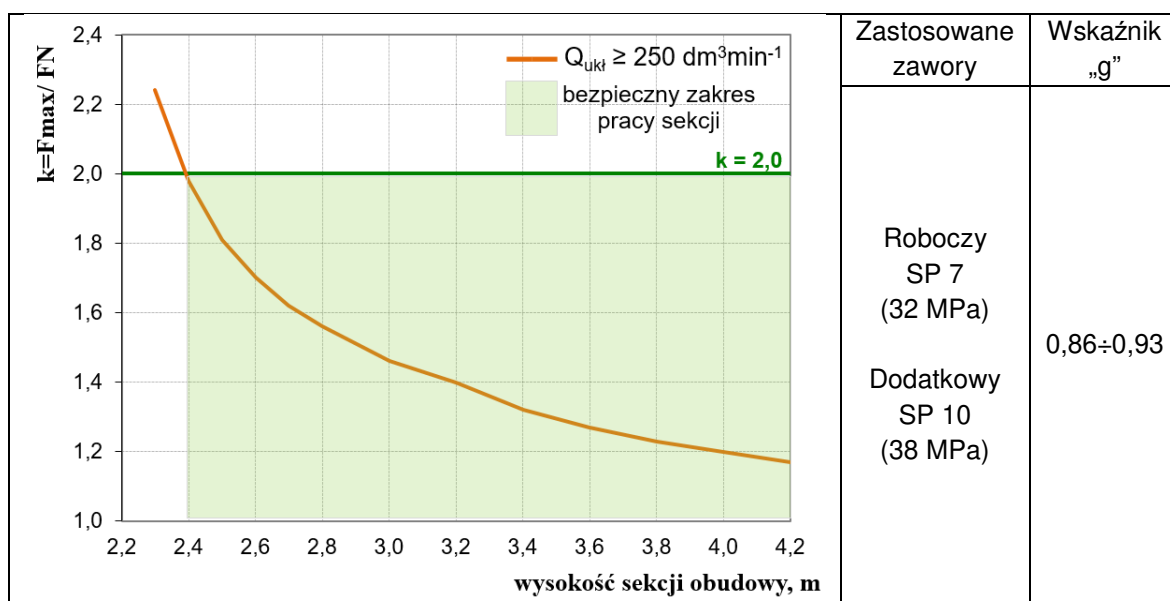
8.2. Sprawdzenie doboru i upodatnienia dla wprowadzonych zmian (modernizacji)

Po dokonanych zmianach w układzie hydraulicznym stojaków (o średnicach I stopnia \varnothing 0,32 i 0,37 m), przedstawionych na rysunku 8.2, oraz zmianie parametrów roboczych sekcji obudów ($P_r = 32,0$ MPa), dokonano powtórnego ich doboru do warunków górniczych (obliczono wartość wskaźnika nośności stropu „g”) oraz określono warunki ich upodatnienia. Na rysunkach 8.3÷8.5 przedstawiono charakterystyki upodatnienia sekcji II, III i IV oraz wskaźnika utrzymania stropu „g” dla poszczególnych warunków geologiczno-górniczych.

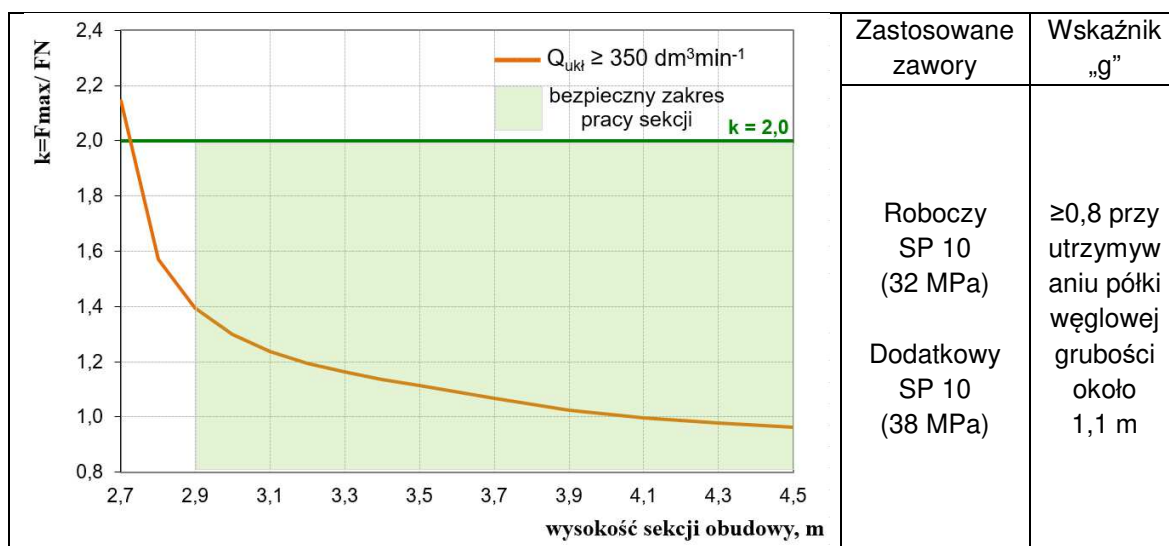


Rys. 8.3. Charakterystyka upodatnienia sekcji II (Tablica 5.1) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/32/35$ MPa;

* – z uwagi na konieczność utrzymania minimalnej różnicy nastaw pomiędzy zaworami. W sekcji II i III zastosowano taki sam stojak



Rys. 8.4. Charakterystyka upodatnienia sekcji III (Tablica 5.1) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/32/38$ MPa



Rys. 8.5. Charakterystyka upodatknienia sekcji IV (Tablica 5.1) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/32/45$ MPa

Wprowadzone modyfikacje w układzie zabezpieczającego stojak sekcji przed przeciążeniem oraz obniżenie parametrów roboczych sekcji obudów nie spowodowało pogorszenia warunków utrzymania stropu w analizowanych ścianach, o czym świadczą wartości wskaźnika nośności stropu „g” (rys. 8.3÷8.5). Spadek wartości wskaźnika „g” w analizowanych przypadkach wynosi około 1,5÷2,5%, co wynika głównie z zastosowanych dużych średnic stojaków i ich podporności.

Dokonane zmiany w układzie sterowania stojaków sekcji umożliwiły ponowne uruchomienie ścian oraz wyeliminowanie występujących uszkodzeń elementów hydrauliki sterującej.

Zmiany parametrów roboczych sekcji obudowy zmechanizowanej i usprawnienie układu sterowania stojakiem hydraulicznym umożliwiły prowadzenie eksploatacji pokładów z wykorzystaniem analizowanych obudów, z zachowaniem niezbędnego stopnia bezpieczeństwa. Według dokonanych zmian sekcje obudów zmechanizowanych będą pracowały do czasu przeprowadzenia planowanych remontów. Remont sekcji pozwoli na wprowadzenie niezbędnych zmian pozwalających na pełne wykorzystanie podporności sekcji.

9. Badania modelowe przepływów w przyłączy stojakowym

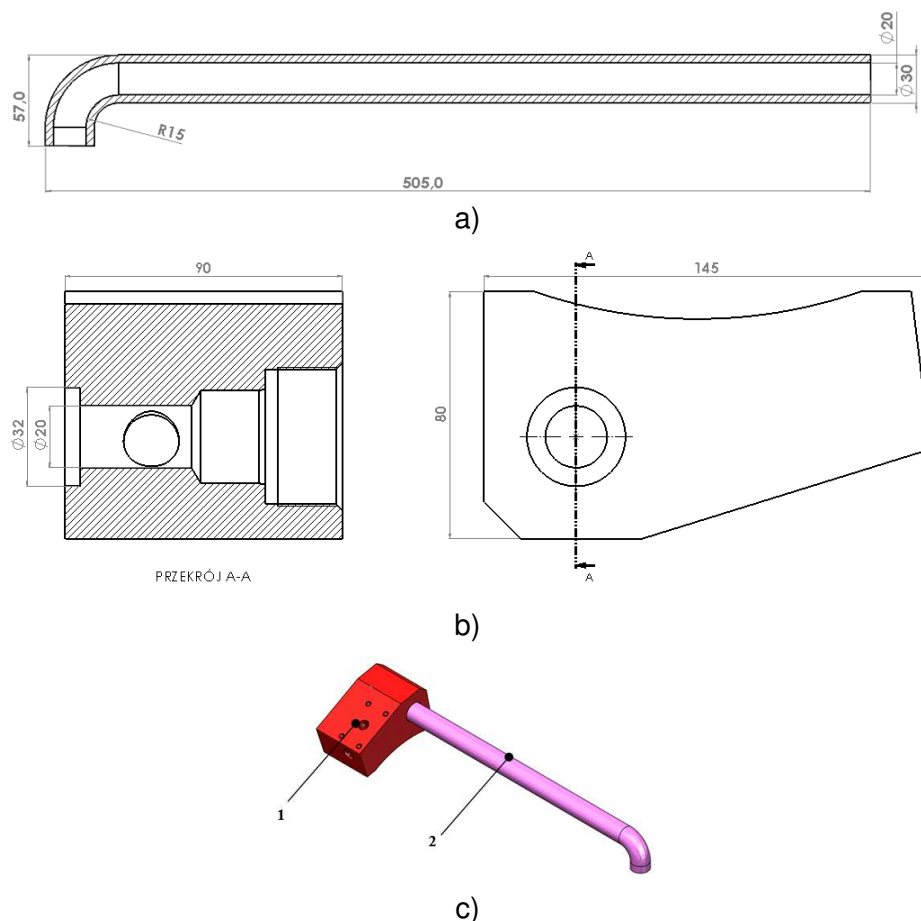
W metodzie upodatnienia GIG uwzględnia się jako jeden z istotnych elementów bezpieczeństwa sekcji, przepływ w układzie zabezpieczającym stojak przed przeciążeniem (Rajwa, Prusek, Stoiński 2016, Rajwa, Masny, Wrana 2017, Stoiński 2018). Układ taki składa się z zaworu hydraulicznego ograniczającego ciśnienie oraz rurki doprowadzającej do niego ciecz z przestrzeni roboczej stojaka. Charakterystyka przepływów rurki, rozumiana jako zależność ciśnienia od wartości przepływu objętościowego strugi cieczy, decyduje wraz z parametrami zaworu o skuteczności zabezpieczenia stojaka przed przeciążeniem. Pogarszające się warunki górnicze (zwiększenie głębokości eksploatowanych pokładów, zagrożenie wstrząsami górotworu) skutkują koniecznością zwiększania podporności sekcji w drodze stosowania stojaków o coraz większych średnicach ($\varnothing \geq 0,30$ m). Dodatkowo utrzymująca się tendencja wyprowadzania układów sterujących stojakiem możliwie wysoko ponad spąg, wydłuża znacznie drogę strugi cieczy z przestrzeni roboczej stojaka do zaworu ograniczającego ciśnienie. Wymagane dla zabezpieczenia stojaków o dużej średnicy przepływy spowodowały konieczność optymalizacji strugi cieczy ukierunkowane na zmniejszenie strat przepływów ciągłych i miejscowych. W niniejszym rozdziale przedstawiono sposób optymalizacji układu zabezpieczającego stojak hydrauliczny przed przeciążeniem, w szczególności optymalizację kształtu strugi cieczy prowadzonej rurką przyłączeniową z przestrzeni roboczej stojaka do zaworu ograniczającego ciśnienie, przy wykorzystaniu analizy numerycznej programem SolidWorks Flow Simulation (Jonuskaite 2017; Kaziemierski 2004; Mazurek 2019; Rajwa, Janoszek, Świątek 2019).

9.1. Przygotowanie modelu

Pierwszym etapem modelowania numerycznego z wykorzystaniem metod CFD (Computational Fluid Dynamics) jest zdefiniowanie jego celu, czyli rozpatrzenie zjawisk fizycznych, warunków jednoznaczności rozwiązania modelu numerycznego oraz wielkości obszaru obliczeniowego. Drugim etapem jest opracowanie geometrii konstrukcji, który stanowi odzwierciedlenie rzeczywistego obiektu badań. Po utworzeniu modelu geometrycznego kolejnym etapem jest dyskretyzacja (wygenerowanie siatki obliczeniowej), która stanowi obszar rozwiązania numerycznego, analizowanego zagadnienia. Ostatnim etapem procesu modelowania jest właściwe zdefiniowanie ustawień dla badanego problemu (solvera) i wykonanie

obliczeń numerycznych przy bieżącym monitorowaniu zbieżności uzyskiwanego rozwiązania numerycznego.

Analizowane przyłącze stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej prezentuje rysunek 9.1. Składa się ono z odpowiednio wyprofilowanej rurki oraz specjalnej końcówki służącej do podłączenia zaworu ograniczającego ciśnienie. Oba elementy wykonane są z niskostopowej stali konstrukcyjnej, która cechuje się wysoką wytrzymałością i ciągliwością, dobrą obróbką oraz droбноziarnistością struktury stopu.

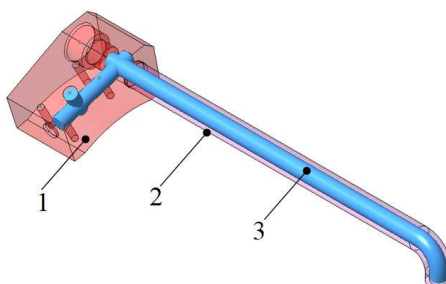


Rys. 9.1. Przyłącze zaworu stojakowego;
 a) rurka gięta; b) przyłącze pod blok; c) analizowany model złożeniowy przyłącza stojaka sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej,
 gdzie: 1 – przyłącze pod blok stojakowy, 2 – rurka gięta

Przedmiotem przeprowadzonej analizy był przepływ objętościowy cieczy roboczej przez analizowane przyłącze, jako funkcja ciśnienia zasilania. Przyjęto następujące warianty obliczeń:

- wpływ geometrii strugi na charakterystykę przepływu – wariant I,
- wpływ przekroju strugi na charakterystykę przyłącza – wariant II,
- wpływ zapowietrzenia cieczy – wariant III.

Dla analizowanego modelu złożeniowego przyłącza wygenerowano obszar dyskretyzacji w postaci siatki numerycznej utworzonej z 21771 punktów węzłowych połączonych 63015 elementami prostymi, która stanowi odwzorowanie geometrii przestrzeni zajmowanej przez płyn – rysunek 9.2 (objętość 0.000198 m³).



Rys. 9.2. Przyłącze zaworu stojakowego;
gdzie: 1 - przyłącze pod blok, 2 - rurka gięta, 3 - wydodrębniona objętość płynu

Dla potrzeb modelowanego zagadnienia uwzględniono następujące warunki brzegowe:

- 1) Dla wariantu I i II w obliczeniach uwzględniono płyn, który stanowi wodę o następujących parametrach:
 - gęstość $\rho = 999,76 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
 - lepkość dynamiczna $\mu = 0,0017912 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 - ciepło właściwe $c_p = 4219,9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
 - zakres zmian wartości strumienia objętości $V = 0\div 2000 \text{ dm}^3\cdot\text{min}^{-1}$.
- 2) Dla wariantu III w obliczeniach uwzględniono płyn, który stanowi mieszaninę dwufazową w postaci wody i powietrza, o następujących parametrach powietrza:
 - gęstość $\rho = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
 - lepkość dynamiczna $\mu = 6,04\text{e}^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 - ciepło właściwe $c_p = 1029,1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
 - zakres zmian wartości strumienia objętości $V = 0\div 2000 \text{ dm}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

Wyniki prowadzonych badań modelowych przedstawiono na wykresach w zależności $P=f(Q)$.

9.2. Analizy numeryczne przepływów

Analizy poszczególnych wariantów przyłączy przeprowadzono z wykorzystaniem programu SolidWorks 2018 z nakładką Flow Simulation. SolidWorks to oprogramowanie do projektowania wspomaganego komputerowo CAD, które służy do tworzenia modeli 2D lub 3D. Ten prosty, a jednocześnie bardzo wydajny program

komputerowy umożliwia projektantom tworzenie bardzo szczegółowych części i zespołów na etapie projektowania a także rysunków wykonawczych. SolidWorks to narzędzie do obsługi wielu etapów rozwoju danego produktu. Pozwala zbadać projekt bezpośrednio przed produkcją, przy użyciu szerokiej gamy dostępnych narzędzi takich jak: numerycznej mechaniki płynów CFD (Computational Fluid Dynamics) a kończąc na analizie statycznej i dynamicznej wytrzymałości konstrukcji badanego prototypu zgodnie z metodą elementów skończonych FEM (Jonuskaite 2017, SolidWorks Help).

Symulacja procesu przepływu strugi płynu wspomaganego metodami CFD w przestrzeni, którą stanowi objętość zajmowana przez analizowany płyn, sprowadza się do uzyskania rozwiązania układu równań różniczkowych interpretujących zasadę zachowania masy i pędu poruszającego się płynu (równanie Navier'a–Stokes'a). Takimi fundamentalnymi równaniami wyrażającymi zachowanie przepływającego płynu wzdłuż zadanej geometrii badanego w programie SolidWorks Flow Simulation są zależności zdefiniowane w następującej postaci (Jonuskaite 2017, SolidWorks Help):

- równanie zachowania masy:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (9.1)$$

- równanie Navier'a – Stokes'a :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 v \quad (9.2)$$

Wpływ zaistniałych zakłóceń w procesie przenoszenia płynu, w przestrzeni o zadanej geometrii, zinterpretowano modelem turbulencji $k-\varepsilon$. Rozwiązanie tego modelu sprowadza się do określenia wartości lepkości turbulencji μ_t z wykorzystaniem energii kinetycznej wirów k i szybkości dyssypacji ε związanej z rozpraszaniem energii, spowodowanej występowaniem wewnętrznych oporów ruchu przepływającego płynu wzdłuż kanału zgazowującego. Model lepkości turbulencji μ_t przepływającego płynu wyrażany jest równaniem zdefiniowanym w programie SolidWorks Flow Simulation w następującej postaci:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9.3)$$

Równania transportu płynu dla energii kinetycznej burzliwości k oraz dyssypacji ε w programie *SolidWorks Flow Simulation* wyrażono zależnościami w postaci (Jonuskaite 2017, SolidWorks Help):

— dla energii kinetycznej burzliwości:

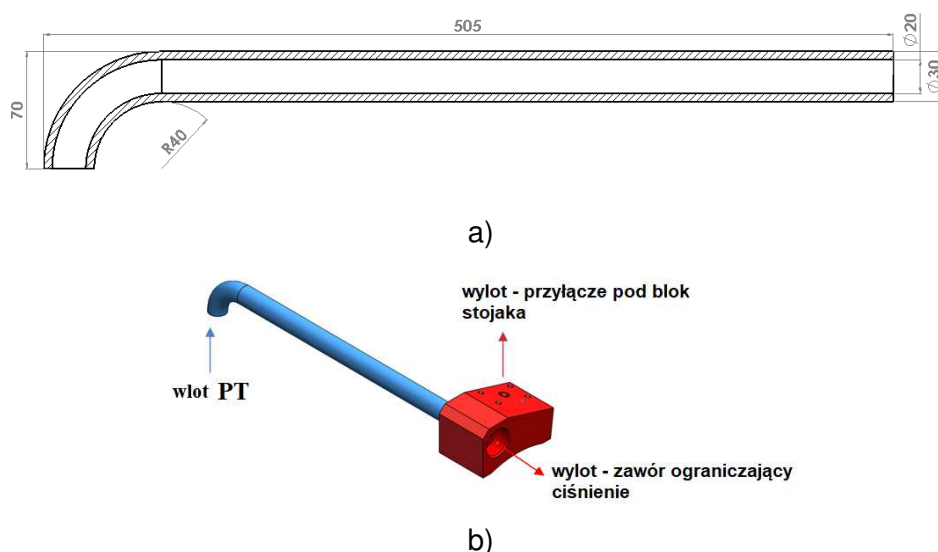
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_i P_B \quad (9.4)$$

— dla energii dyssypacji:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + C_B \mu_i P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (9.5)$$

Wpływ geometrii strugi

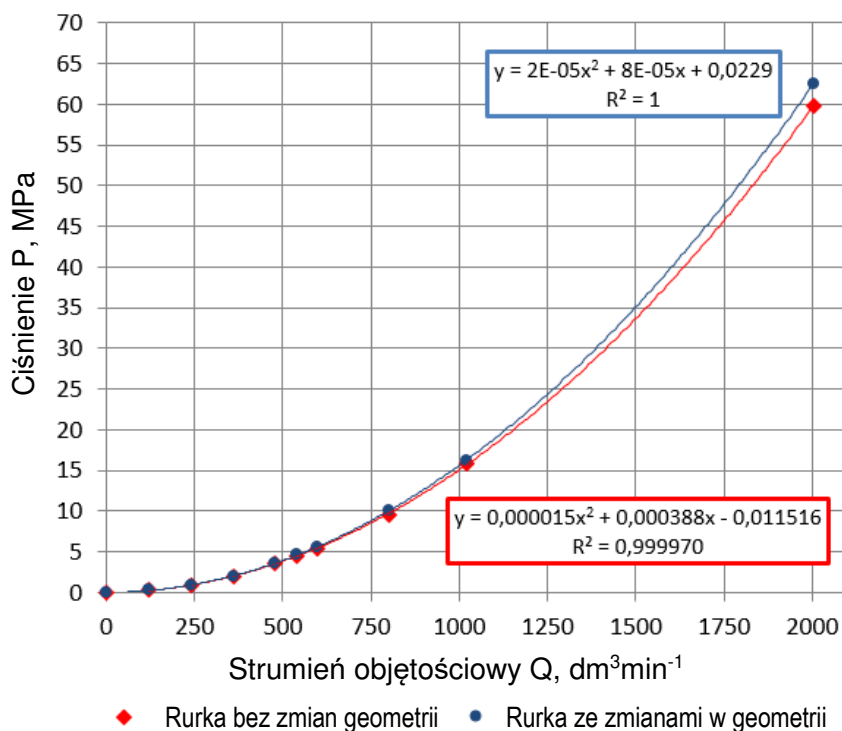
W celu wykazania wpływu zmian geometrii strugi płynu na rozkład ciśnienia wzdłuż analizowanej rurki (rys. 9.1 a) oraz przyłącza pod blok stojakowy sekcji obudowy zmechanizowanej (rys. 9.1 b), przeprowadzono symulacje numeryczne dla modelu w którym modyfikacji poddano promień krzywizny gięcia rurki z wartości $R=15$ mm (rys. 9.1 a) do wartości $R=40$ mm (rys. 9.3 a). Na rysunku 9.3 pokazano podstawowe wymiary zmienionej geometrii rurki przyłącza stojaka (rys. 9.3 a) oraz widok modelu przestrzennego przyłącza rurki w złożeniu (rys. 9.3 b).



Rys. 9.3. Widok zmienionej geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej; a) rysunek konstrukcyjny, b) widok przestrzenny

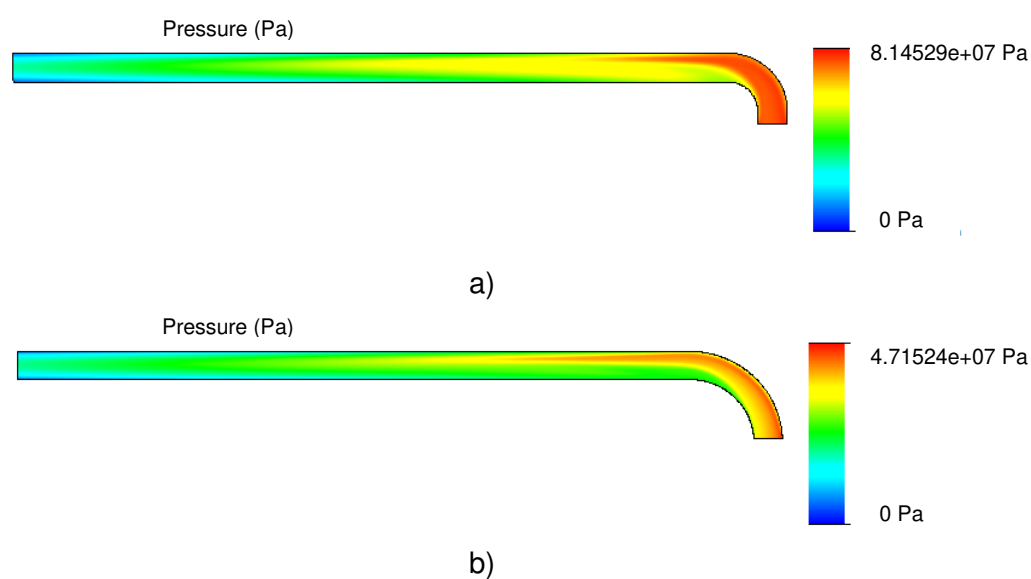
Obliczenia numeryczne prowadzono w zakresie zmian strumienia objętości wody w przedziale od 0 do $2000 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ symulując dopływ cieczy do zmodyfikowanej (rys. 9.3) oraz niezmodyfikowanej (rys. 9.1) geometrii rurki, w sposób jak pokazano na rysunku 9.3. Wylot z badanego układu przyłącza stanowiło gniazdo mocowania zaworu przelewowego. W trakcie prowadzonych badań modelowych dokonywano pomiaru zmian wartości ciśnienia na wylocie z przyłącza pod blok stojakowy.

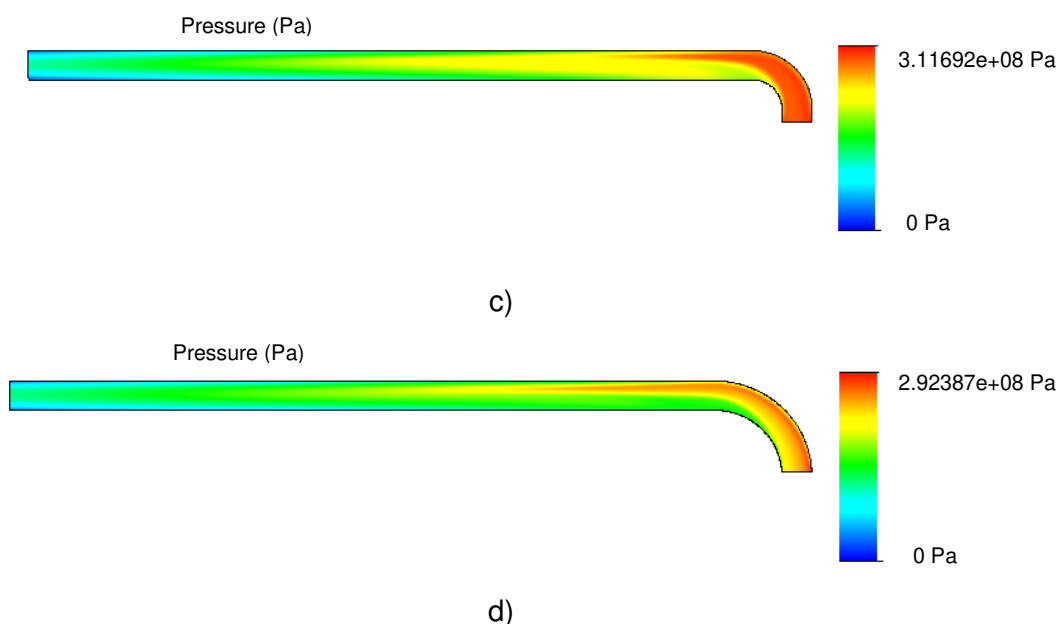
Otrzymane wyniki prowadzonych symulacji numerycznych zaprezentowano na rysunku 9.4 w postaci wykresu $P = f(Q)$, gdzie P to zmiana rozkładu ciśnienia wzdłuż przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej.



Rys. 9.4. Charakterystyka zmian wartości ciśnienia na wylocie z przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej w zależności od wartości strumienia objętościowego cieczy

Dodatkowo na rysunku 9.5 zaprezentowano mapę rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż badanych geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej dla strumienia objętości cieczy wynoszącej 1000 dm³min⁻¹ oraz 2000 dm³min⁻¹.





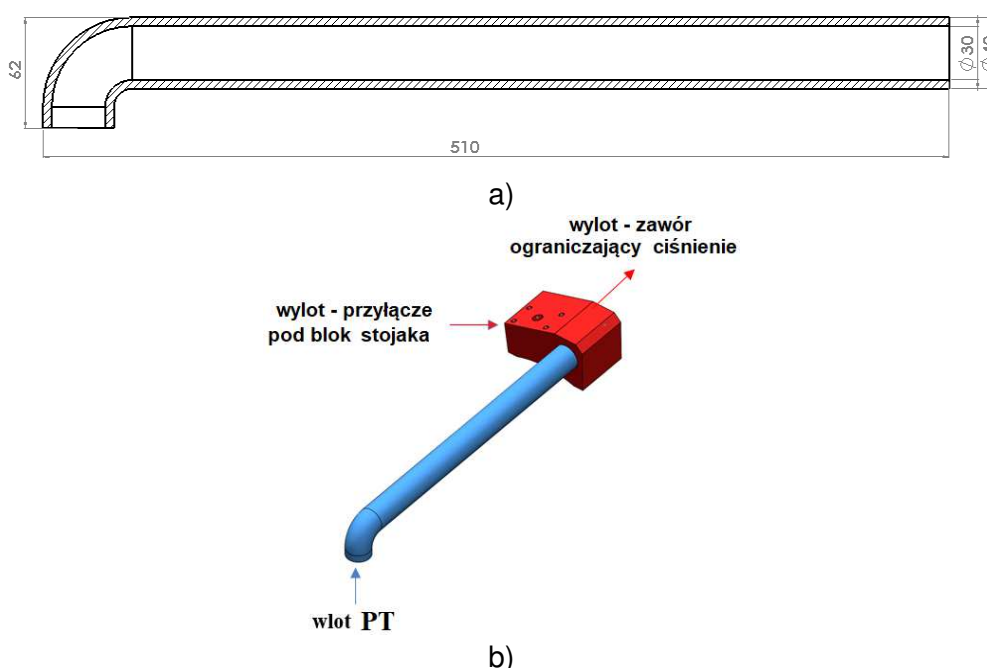
Rys. 9.5. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż badanych geometrii rurki przyłączeniowej stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej:

- dla wartości strumienia objętości cieczy $1000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$:
 - a) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.1;
 - b) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.3;
- dla wartości strumienia objętości cieczy $2000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$:
 - c) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.1;
 - d) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.3.

Analizując przebieg krzywych na rysunku 9.4 można stwierdzić, że zwiększenie promienia gięcia przyłącza stojaka o 60% powoduje wzrost ciśnienia strugi na wylocie przyłącza pod blok stojakowy sekcji obudowy zmechanizowanej średnio o 3,0 MPa dla prognozowanej wartości strumienia objętości strugi wynoszącej $2000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Przyrost ciśnienia na wylocie jest spowodowany zmniejszeniem oporów ciśnienia przepływu strugi cieczy na zmodyfikowanym odcinku rurki (zmiana promienia). Ponadto obserwując przebieg map zmian ciśnienia strugi wzdłuż badanych wariantów kształtu przyłącza można stwierdzić, że zwiększenie promienia gięcia rurki zmniejsza opory ciśnienia cieczy na wlocie do przyłącza średnio o 40% prognozując redukcję wartości ciśnienia z wartości około 81,5 MPa do około 47,0 MPa dla strumienia objętości wynoszącego $1000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 9.5 a i b) oraz średnio o 10% prognozując redukcję ciśnienia z wartości około 312,0 MPa do około 292,0 MPa (rys. 9.5 c i d) dla wartości strumienia objętości strugi wynoszącej $2000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Wpływ przekroju strugi

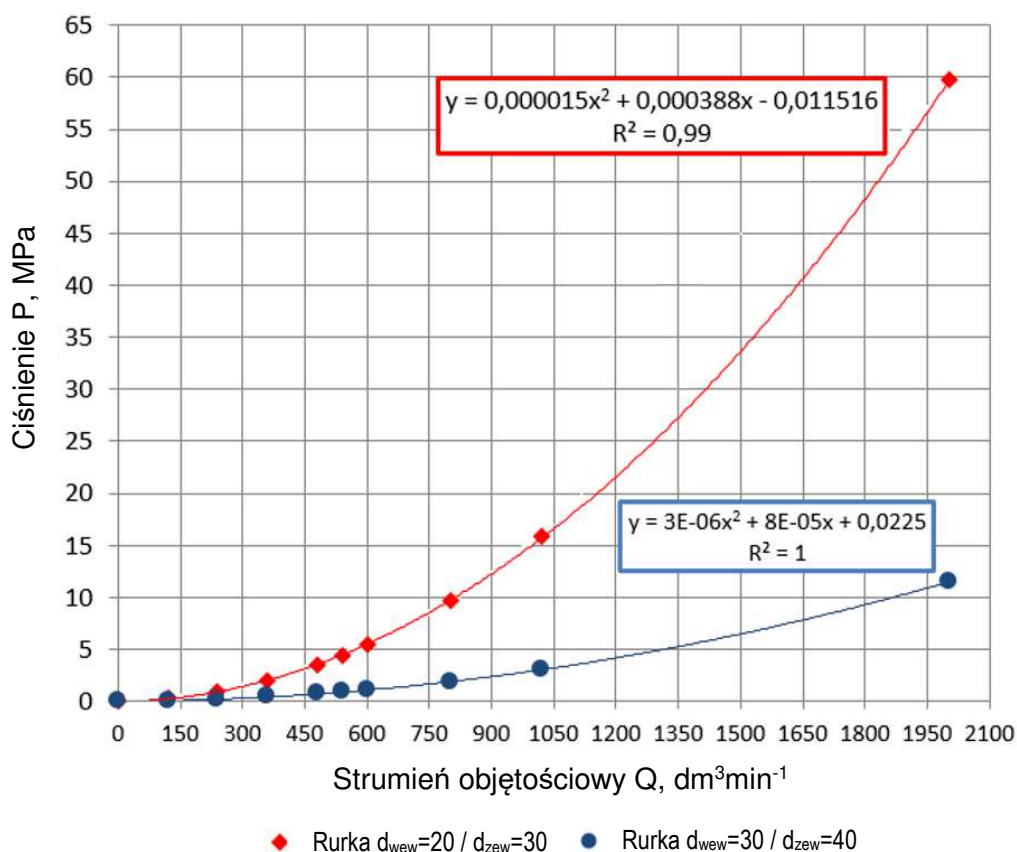
W celu rozpatrzenia wariantu związanego z wpływem zmian wartości przekroju poprzecznego strugi cieczy na rozkład ciśnienia wzdłuż rurki oraz przyłącza pod blok stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej przeprowadzono symulacje numeryczne dla modelu złożeniowego przyłącza, w którym modyfikacji poddano średnice wewnętrzną (d_{wew}) oraz zewnętrzną (d_{zew}) rurki. Podstawowe wartości średnic tj. $d_{wew} = 20$ mm i $d_{zew} = 30$ mm zwiększono do wartości $d_{wew} = 30$ mm i $d_{zew} = 40$ mm. Rysunek 9.6 prezentuje podstawowe wymiary zmienionej rurki przyłącza stojaka (rys. 9.6 a) oraz widok modelu przestrzennego w złożeniu z przyłączem pod blok (rys. 9.6 b).



Rys. 9.6. Widok zmienionej geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej; a) rysunek konstrukcyjny, b) widok przestrzenny

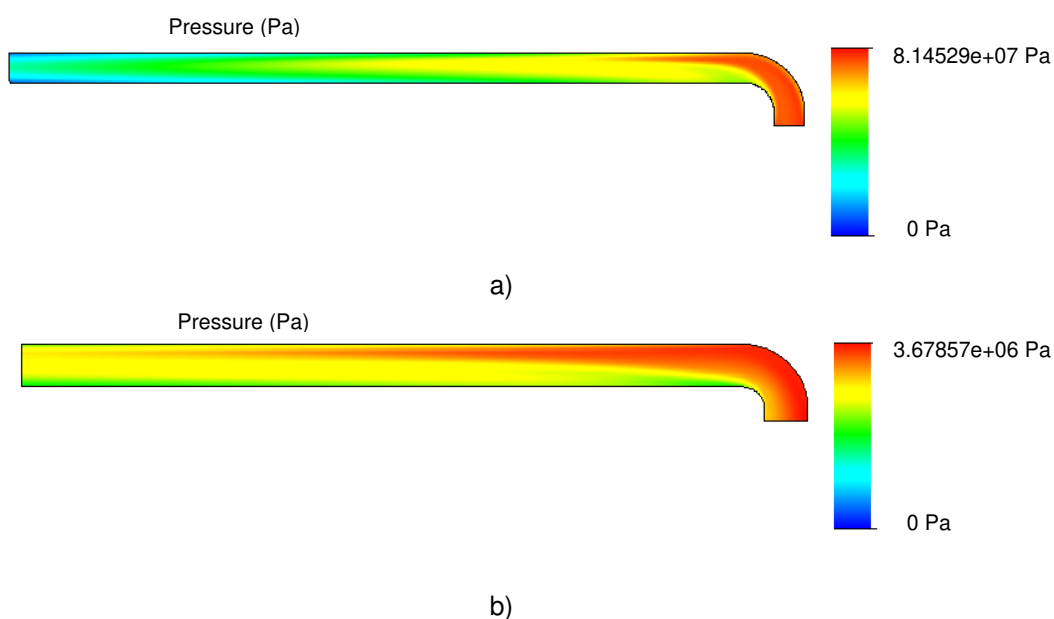
Obliczenia numeryczne przeprowadzono w zakresie zmian strumienia objętości wody w przedziale od 0 do $2000 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$ symulując dopływ cieczy do zmodyfikowanej oraz niezmodyfikowanej geometrii przyłącza stojaka w sposób jak pokazano na rysunku 9.6. W trakcie prowadzonych badań modelowych dokonywano obliczeń zmian wartości ciśnienia na wylocie z przyłącza pod blok stojakowy.

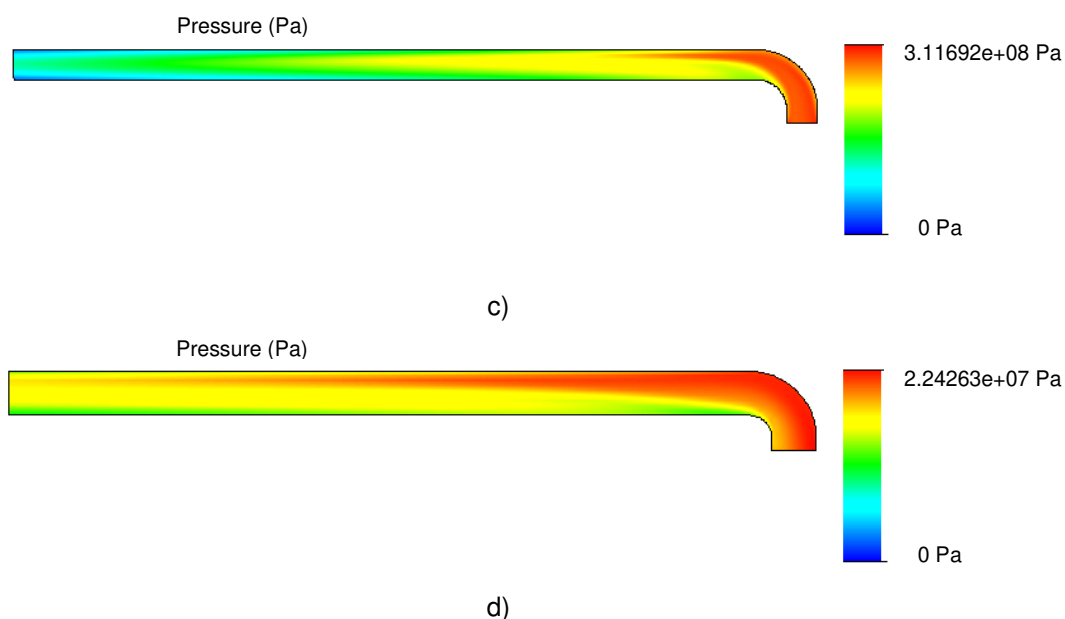
Wyniki analizy numerycznej zmodyfikowanego przyłącza zaprezentowano na rysunku 9.7 w postaci wykresu $P = f(Q)$.



Rys. 9.7. Charakterystyka zmian wartości ciśnienia wzdłuż badanych geometrii na wylocie z przyłącza stojaka sekcji w zależności od wartości strumienia objętościowego cieczy

Dodatkowo na rysunku 9.8 przedstawiono mapę rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż badanych przyłączy stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej dla wartości strumienia objętości płynu wynoszącej 1000 i 2000 dm³min⁻¹.





Rys. 9.8. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż badanych geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej:

- dla wartości strumienia objętości płynu $1000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$:
 - a) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.1;
 - b) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.6;
- dla wartości strumienia objętości płynu $2000 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$:
 - c) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.1;
 - d) rozkład zmian ciśnienia dla geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej z rys. 9.6.

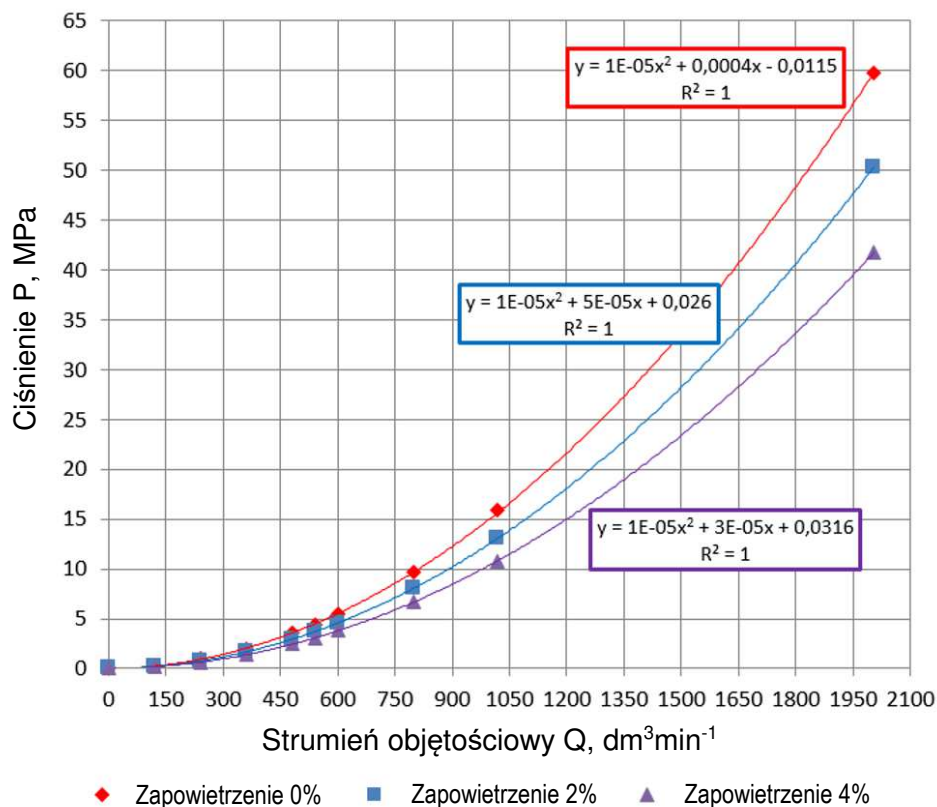
Z przebiegu krzywych przedstawionych rysunku 9.7 można zaobserwować, że zwiększenie przekroju poprzecznego analizowanej rurki (z $d_{\text{weW}}=20 / d_{\text{zew}}=30$ do $d_{\text{weW}}=30 / d_{\text{zew}}=40$) może powodować redukcję ciśnienia strugi na wylocie przyłącza pod blok stojaka średnio o 80% z wartości około 59,0 MPa do wartości 11,0 MPa.

Ponadto obserwując przebieg map zmian ciśnienia strugi wzdłuż badanych wariantów kształtu przyłącza można stwierdzić, że w przypadku szerszej średnicy uzyskujemy lepszy rozkład naprężeń wzdłuż całej długości rurki, co konstrukcyjnie jest rozwiązaniem lepszym.

Wpływ zapowietrzenia strugi

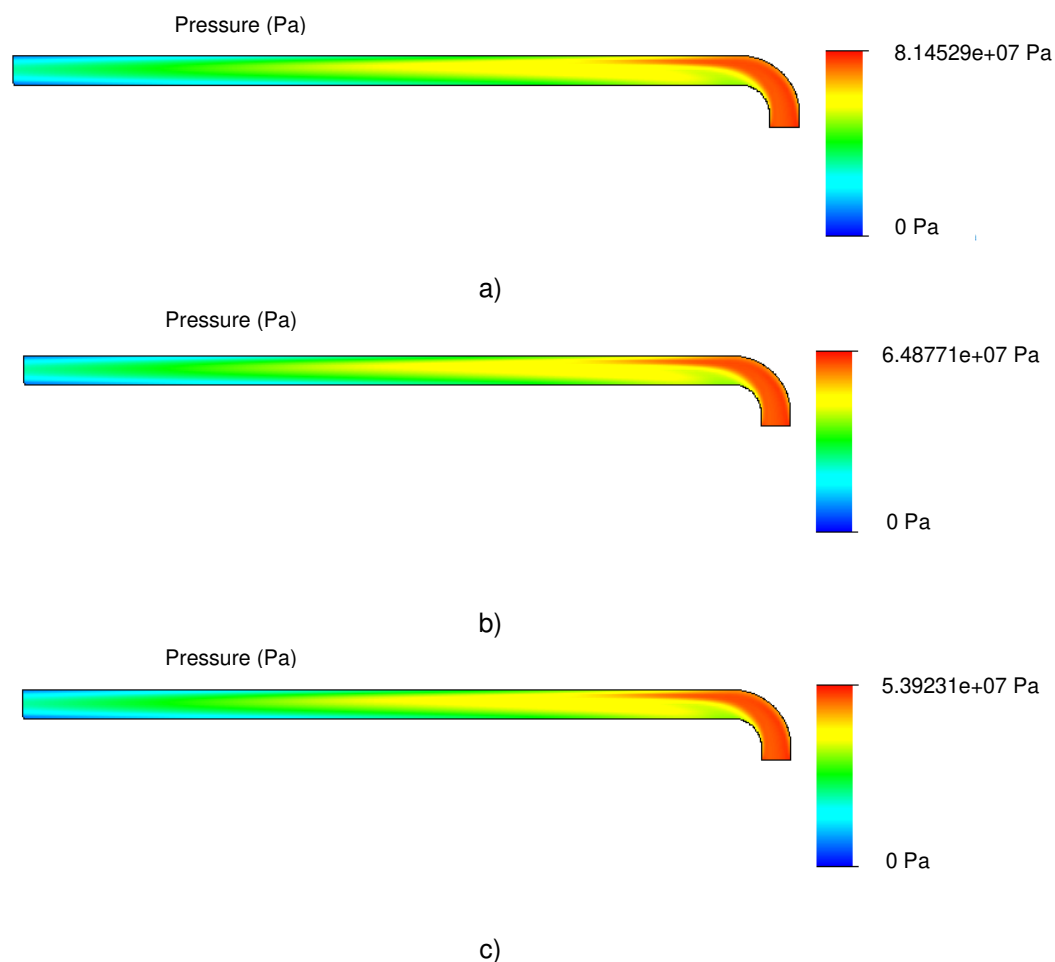
W celu rozpatrzenia wariantu związanego z możliwością wystąpienia nieszczelności w układzie przyłącza stojaka, rozpatrzono wariant obliczeniowy wpływu zawartości powietrza w strumieniu objętościowym cieczy na rozkład ciśnienia wzdłuż elementu rurki oraz przyłącza pod blok stojakowy, mierzony na wylocie w miejscu mocowania zaworu ograniczającego ciśnienie. Obliczenia przeprowadzono dla

warunku zapowietrzenia strugi płynu w zakresie od 0 do 4%. Wyniki zaprezentowano na rysunku 9.9 w postaci charakterystyki zmian ciśnienia na wylocie z przyłącza pod blok, w funkcji zmian wartości strumienia objętości cieczy oraz zawartości powietrza w płynie (mieszanka dwufazowa powietrzno-wodna).



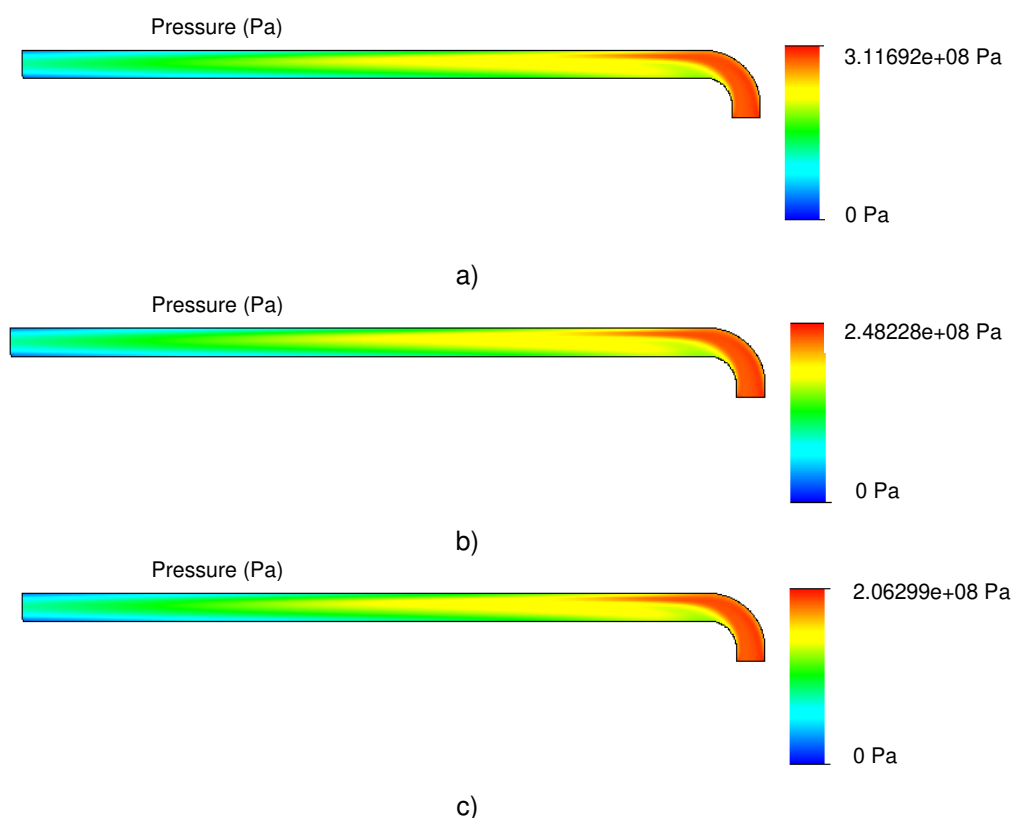
Rys. 9.9. Charakterystyka zmian wartości ciśnienia na wylocie z przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej w zależności od wartości strumienia objętości oraz zawartości powietrza w cieczy (mieszanka dwufazowa powietrzno-wodna)

Na rysunkach 9.10 i 9.11 przedstawiono mapę rozkładu zmian ciśnienia cieczy zawierającego od 2 do 4% powietrza dla wartości strumienia objętości płynu wynoszącego 1000 oraz 2000 dm³min⁻¹.



Rys. 9.10. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż analizowanego przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej wg rysunku 9.1 dla wartości strumienia objętości płynu $1000 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$:

- rozkład zmian ciśnienia dla szczelnego układu przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej;
- rozkład zmian ciśnienia dla przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej zapowietrzonego w ilości 2%;
- rozkład zmian ciśnienia dla przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej zapowietrzonego w ilości 4%;



Rys. 9.11. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż analizowanego przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej wg rysunku 9.1, dla wartości strumienia objętości płynu $2000 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$:

- rozkład zmian ciśnienia dla szczelnego układu przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej;
- rozkład zmian ciśnienia dla przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej zapowietrzonego w ilości 2%;
- rozkład zmian ciśnienia dla przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej zapowietrzonego w ilości 4%

Analizując wykres przebiegu zmian ciśnienia na wylocie z przyłącza, który przedawniono na rysunku 9.9, można stwierdzić, że wzrost zawartości powietrza w strumieniu cieczy w przedziale od 0 do 4% powoduje spadek ciśnienia płynu (mieszanki dwufazowej cieczy i powietrza) mierzonego na wylocie z przyłącza pod blok stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej średnio o 30%. Wydaje się to korzystne, jednak obserwując przebieg map zmian ciśnienia strugi wzdłuż analizowanej rurki przyłączeniowej nie można zaobserwować polepszenia rozkładu naprężeń.

9.3. Podsumowanie przeprowadzonych analiz numerycznych

Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że istotny wpływ na ograniczenie strat przepływu cieczy z zabezpieczanej przestrzeni stojaka do zaworu ograniczającego ciśnienie ma geometria strugi cieczy oraz poprzeczny przekrój strugi cieczy, wynikający ze średnicy zastosowanej rurki. Parametry te nabierają szczególnego znaczenia przy dużej wartości przepływów cieczy w układzie.

Chropowatość rurki wewnętrznej doprowadzającej ciecz do zaworu hydraulicznego w niewielkim stopniu wpływa na straty przepływu.

Zawartość powietrza w analizowanej strudze, w ilości kilku procent, nieznacznie wpłynęła na przeprowadzone analizy. Jednak przy większej ilości powietrza w strudze należy przeprowadzić powtórne obliczenia, w celu weryfikacji wpływu zapowietrzenia na pracę układu zabezpieczającego.

Zaznaczyć należy także, że wartość strat przepływu strugi cieczy uzależniona jest od wielu parametrów, w większości posiadających nieliniowe charakterystyki, dlatego też najbardziej racjonalne jest rozpatrywanie każdego przypadku indywidualnie.

Wymienione powyżej wnioski, dotyczące budowy przyłącza stojakowego wyprowadzającego ciecz z przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) do zaworu ograniczającego ciśnienie uwzględniono w dalszej części pracy.

10. BADANIA OBCIĄŻONEGO DYNAMICZNIE MODELOWEGO STOJAKA

W celu właściwego dobrania układów zabezpieczających stojak hydrauliczny sekcji, przeznaczonej do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu przeprowadzono badania w stanowiskach laboratoryjnych modelu stojaka, z wykorzystaniem obciążenia dynamicznego. W badaniach wykorzystano specjalnie przygotowany model stojaka wyposażony w różne przyłącza służące do wyprowadzania cieczy z przestrzeni podtłokowej (PT). Przyłącza zaprojektowano w oparciu o przeprowadzone modelowanie numeryczne (patrz rozdział 9) którego celem była optymalizacja przepływów cieczy.

Badania modelu stojaka pod obciążeniem dynamicznym przeprowadzono w stanowiskach w GIG Katowice oraz ITG KOMAG Gliwice.

10.1. Model stojaka przeznaczonego do badań dynamicznych z różnymi przyłączami i wyposażeniem

Do badań pozyskano stojaki hydrauliczne dwuteleskopowe z sekcji obudów zmechanizowanych pracujących w ścianach, gdzie wystąpiły problemy techniczne spowodowane występowaniem uderów hydraulicznych. Stojaki dwuteleskopowe z zaworem dennym o średnicach I stopnia \varnothing 0,32 i 0,37 m w których ciecz z przestrzeni roboczej wyprowadzana jest poprzez wiercenia w płaszczu cylindra, przedstawione zostały na fotografiach 10.1 oraz 10.2.



Fot. 10.1. Pozyskany do badań stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m, z zaznaczonym oryginalnym przyłączem (wyprowadzenie cieczy z podtłoka PT wierceniami w płaszczu cylindra $3 \times \varnothing$ 0,008 m) (źródło własne)



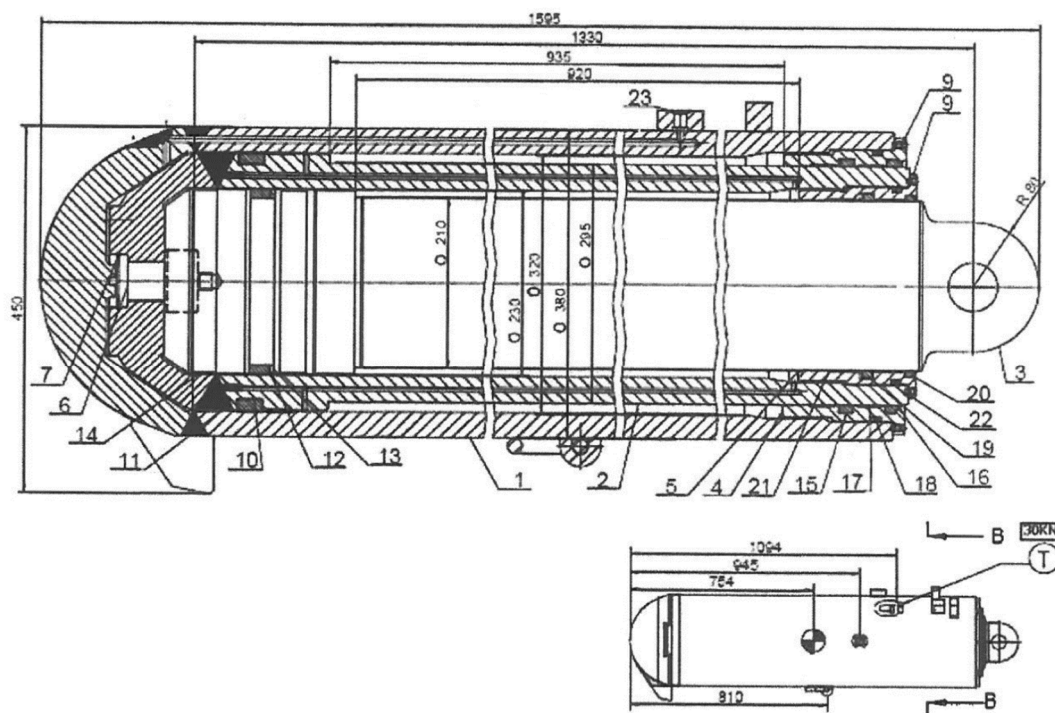
Fot. 10.2. Pozyskany do badań stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m z zaznaczonym oryginalnym przyłączem (wyprowadzenie cieczy z podłoka PT wierceniami w płaszczu cylindra $3 \times \varnothing$ 0,009 m) (źródło własne)

Pozyskane stojaki do badań zostały odpowiednio zmodernizowane w Zakładzie Remontowo-Produkcyjnym PGG S.A. (ZRP). Każdy stojak został rozebrany na części, wyczyszczony, wymieniono uszczelnienia, wykonano honowanie, a następnie wyposażono je w odpowiednie przyłącza dla wyprowadzania cieczy z przestrzeni roboczej stojaka i podłączenia zaworów i bloków stojakowych. Dodatkowo zrobione zostały wyprowadzenia do podłączenia przetworników pomiaru ciśnienia cieczy pod tłokiem. Przyłącza zostały przygotowane z uwzględnieniem uwag wynikających z numerycznej analizy przepływów (wg rozdziału 9 niniejszej pracy). Po przeprowadzeniu modernizacji (w tym wstawianiu przyłączy), każdy ze stojaków poddany został zbadany z uwagi na funkcjonalność i szczelność. Przeprowadzone próby wykazały brak szczelności stojaka o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m. Przyczyną nieszczelności była rysa wewnątrz cylindra I stopnia stojaka – fotografia 10.3. Pomimo dwukrotnego honowania stojaka, nie udało się uzyskać odpowiedniej powierzchni cylindra, a tym samym stojak ponownie nie przeszedł próby szczelności.



Fot. 10.3. Widoczna rysa wewnątrz cylindra honowanego stojaka o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m

Dlatego też do dalszych badań przeznaczony został stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m, którego rysunek konstrukcyjny przedstawia rysunek 10.1.



Rys. 10.1. Rysunek konstrukcyjny badanego stojaka hydraulicznego o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m (DTR analizowanej obudowy)

Przygotowany do badań model wraz z dodatkowymi przyłączami przedstawia fotografia 10.4, na której poszczególnymi cyferkami oznaczono przyłącza i wyprowadzania wykorzystywane w badaniach, gdzie:

wyprowadzania do badan, gdzie:

- 1 – wiercenia w płaszczu I stopnia cylindra (3x0,8 mm) zakończenie przyłączem na przylgę (wyprowadzanie Producenta);
- 2 – wyprowadzenie dla podłączenia ciśnieniomierza do przestrzeni roboczej (PT) stojaka (DN10);
- 3 – wyprowadzenie dla badania strat ciągłych (M40x2);
- 4 – przyłącze dla podłączenia zaworów hydraulicznych, długość rurki wyprowadzającej ciecz z przestrzeni roboczej stojaka 0,7 m, średnica rurki wyprowadzającej 0,03/0,02 m, gniazda M40x2 oraz DN10;
- 5 – przyłącze dla przyłączenia zaworów hydraulicznych, długość rurki wyprowadzającej ciecz z przestrzeni roboczej stojaka 0,7 m, średnia rurki wyprowadzającej 0,035/0,025 m, gniazda M40x2 oraz DN10;
- 6 – przyłącze dla bezpośredniego przyłączenia zaworu hydraulicznego w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT), długość rurki wyprowadzającej ciecz z przestrzeni roboczej stojaka 0,16 m, średnia rurki wyprowadzającej 0,03/0,02 m, gniazdo M40x2



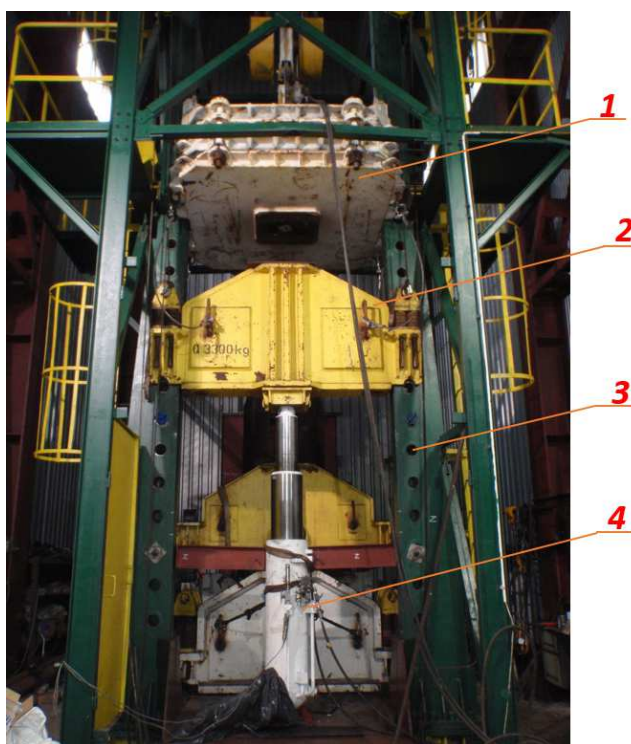
Fot. 10.4. Przygotowany do badań model stojaka wraz z dodatkowymi przyłączami (źródło własne)

Do badań układu sterującego stojaka, przystosowanego wg fotografii 10.4, wykorzystano następujące elementy:

- blok stojakowy pojedynczy o numerze 2010 0312 0502-3a, produkcji Centrum Hydrauliki DOH, podłączony w każdym badaniu do wyprowadzanie oznaczonego nr 1 na fot. 10.4 (blok stojakowy przyłączany na przylgę),
- zawory hydrauliczne ograniczające ciśnienie produkcji Centrum Hydrauliki DOH typ: SP7C o nastawie 38 MPa i króćcu przyłączeniowym DN12; SP10D o nastawie 38 MPa i króćcu przyłączeniowym DN19; SP12E o nastawie 38 MPa i króćcu przyłączeniowym M40x2,
- dodatkowo wykorzystano płytę pośrednią, złączki oraz zawory odcinające także dostarczone przez Centrum Hydrauliki DOH.

10.2. Badania udarem masy modelowego stojaka o średnicy $\varnothing 0,32$ m

Badania przeprowadzono w stanowisku kafarowym w Głównym Instytucie Górnictwa. Wygląd stanowiska prezentuje fotografia 10.5.



Fot. 10.5. Stanowisko kafarowe w GIG (źródło własne);
gdzie: 1 – masa uderowa 20 Mg, 2 – trawersa o masie 3,3 Mg, 3 – prowadnice masy uderowej i trawersy, 4 – badany stojak

Do pomiarów i rejestracji ciśnień wykorzystano następującą aparaturę pomiarową:

- wzmacniacz „SPIDER 8”, firmy HBM o częstotliwość próbkowania 9600 Hz,
- laptop z oprogramowaniem „CAT MAN 5” firmy HBM,
- dwa czujniki (przetworniki) ciśnienia SPAIS PT-5101s, 250 MPa.

Warunki i przebieg badania.

Przystosowany do badań stojak (fot. 10.4) został rozparty w stanowisku z wysuwem I stopnia około 0,58 m oraz II stopnia około 0,53 m. Ciśnienie wstępnego rozparcia stojaka wynosiło 15,0 MPa, z uwagi na możliwości wytrzymałościowe stanowiska. Przy każdej próbie badawczej stojak wyposażony był w odpowiednie elementy hydrauliczne, przetworniki pomiarowe i aparaturę rejestrującą. Podczas przeprowadzania prób badawczych stojak obciążany był swobodnie spadającą masą uderową (20 Mg) z wysokości: 0,2, 0,4 lub 0,5 m. W każdym badaniu ciśnienie rejestrowane było w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) oraz na wejściu do badanego zaworu hydraulicznego ograniczającego ciśnienie (PZ).

Zbadano cztery warianty połączeń elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak a mianowicie:

- Wariant pierwszy: zawór hydrauliczny podłączony bezpośrednio do płyty pośredniej. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym (PZ) oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) – fotografia 10.6.



Fot. 10.6. Wariant pierwszy podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant drugi: zawór hydrauliczny podłączony do przyłącza długiego o średnicy rurki 0,035/0,025 m. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym (PZ) oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) – fotografia 10.7.



Fot. 10.7. Wariant drugi podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant trzeci: zawór hydrauliczny podłączony do przyłącza długiego o średnicy rurki 0,03/0,02 m. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym (PZ) oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) – fotografia 10.8.



Fot. 10.8. Wariant trzeci podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant czwarty: zawór hydrauliczny podłączony bezpośrednio do przestrzeni podtłokowej (PT) I stopnia stojaka, co odzwierciedla przyłącze krótkie o średnicy rurki 0,03/0,02 m. Czujnik ciśnienia w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT i PZ) oraz w bloku stojakowym – fotografia 10.9.



Fot. 10.9. Wariant czwarty podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

W każdym z wymienionych wyżej wariantów przebadano zawory hydrauliczne: SP7C, SP10D i SP12E, przy spadku masy uderowej z wysokości: 0,2 m; 0,4 m lub 0,5 m. Wyniki każdorazowego obciążenia stojaka w postaci zależności chwilowych wartości ciśnienia w funkcji czasu, mierzonego przy badanym zaworze hydraulicznym oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT), zapisano w postaci plików ASCII. Zbiorcze wyniki przeprowadzonych badań prezentuje tablica 10.1 (Sprawozdanie 2019a).

Wyniki przeprowadzonych badań.

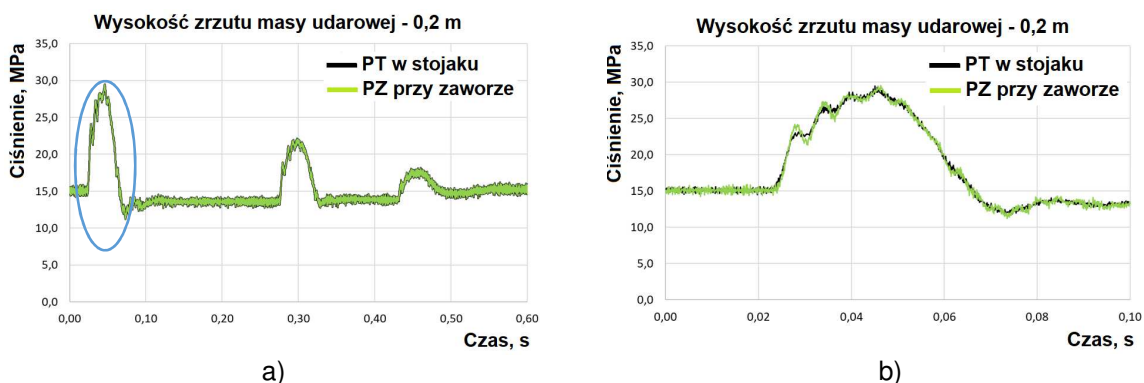
Na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnień, w badanym układzie zabezpieczającym, w postaci plików ASCII, wykorzystując program Excel z pakietu Microsoft Office sporządzono wykresy przedstawiające pełny zarejestrowany przebieg ciśnienia w funkcji czasu oraz pierwszy zarejestrowany największy pik przebiegu. Zbiorcze wyniki badań zebrano w tablicy 10.1, zgodnie z (Sprawozdanie 2019a)

Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że stojak, zawory hydrauliczne oraz blok stojakowy, wykorzystane w badaniach, pozostały sprawne technicznie i szczelne.

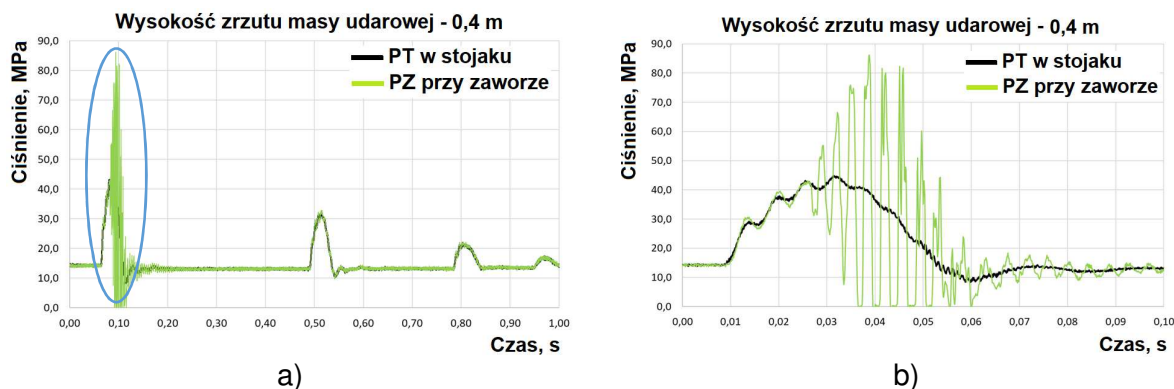
Tablica 10.1. Zbiorcze wyniki przeprowadzonych badań modelu stojaka pod obciążeniem dynamicznym z wykorzystaniem uderu masy (masa uderu $M_u=20$ Mg, masa trawersy $M_t=3,3$ Mg, wysuw I stopnia stojaka 0,58 m, wysuw II stopnia stojaka 0,53 m) (Sprawozdanie 2019a)

Nr próby	Przyłączenie zaworów ograniczających ciśnienie	Typ zaworu	Swobodny spadek masy udarowej h_0 , m	P_{wst} , MPa	Zsuw I stopnia stojaka Δl , $\times 10^{-3}$ m	Maksymalne ciśnienie w podłtoku stojaka PT, MPa	Maksymalne ciśnienie przy zaworze Pz, MPa	Prezentacja przebiegu ciśnienia P(t) – Charakterystyka nr.
Podłączenie przetworników: PT stojaka oraz do bloku stojakowego								
1	Do płyty pośredniej. Wariant pierwszy, fot. 10.6.	SP10	0,2	15,0	-	29,5	29,5	Char. 1 i 1a
2		SP10	0,4	15,0	5	44,84	86,21	Char. 2 i 2a
3		SP12	0,4	15,0	5	44,99	95,57	Char. 3 i 3a
4		SP12	0,4	15,0	5	45,07	89,33	Char. 4 i 4a
Podłączenie przetworników: PT stojaka oraz przy zaworze								
5	Do przyłącza nr długiego z rurką o średnicy 0,035/0,025 m. Wariant drugi, fot. 10.7.	SP12	0,4	15,0	3	45,52	57,61	Char. 5 i 5a
6		SP7	0,4	15,0	4	46,32	46,26	Char. 6 i 6a
7		SP10	0,4	15,0	5	45,99	47,00	Char. 7 i 7a
8		SP10	0,5	15,0	7	51,34	53,36	Char. 8 i 8a
Podłączenie przetworników: PT stojaka oraz przy zaworze								
9	Do przyłącza nr długiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m. Wariant trzeci, fot. 10.8.	SP10	0,4	15,0	3	44,60	45,66	Char. 9 i 9a
10		SP10	0,5	15,0	4	51,34	54,07	Char. 10 i 10a
11		SP12	0,4	15,0	4	44,25	61,21	Char. 11 i 11a
12		SP12	0,5	15,0	4	50,66	58,15	Char. 12 i 12a
13		SP7	0,4	15,0	4	44,93	46,91	Char. 13 i 13a
14		SP7	0,5	15,0	4	50,04	69,98	Char. 14 i 14a
Podłączenie przetworników: PT stojaka								
15	Do przyłącza nr krótkiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m. Wariant czwarty, fot. 10.9.	SP10	0,4	15,0	3	44,93	46,97	Char. 15 i 15a
16		SP10	0,5	15,0	3	51,99	52,59	Char. 16 i 16a
17		SP12	0,4	15,0	2	44,99	45,54	Char. 17 i 17a
18		SP12	0,5	15,0	2	51,49	52,35	Char. 18 i 18a
19		SP7	0,4	15,0	2	44,39	45,07	Char. 19 i 19a
20		SP7	0,5	15,0	2	50,22	52,89	Char. 20 i 20a

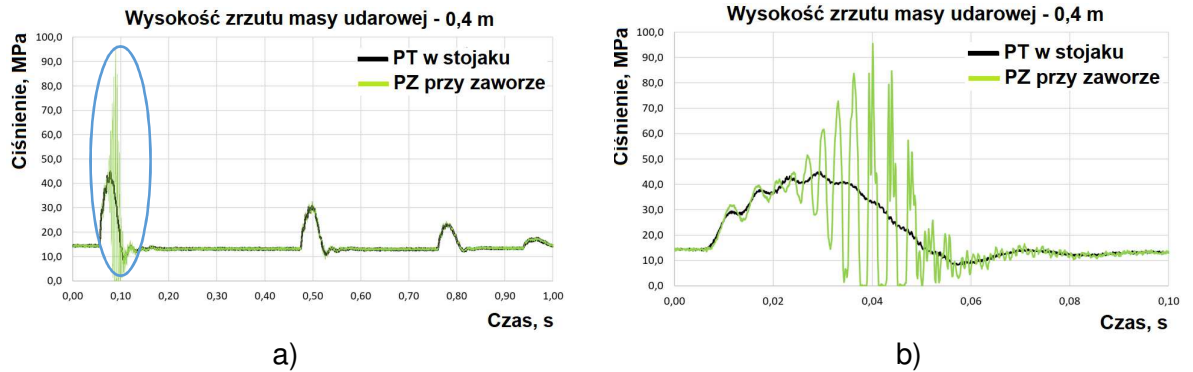
W niniejszej pracy tablicę 10.1 uzupełniono wybranymi, zarejestrowanymi przebiegami ciśnień, pozwalającymi ocenić wpływ sposobu przyłączenia zaworu na występowanie w układzie zabezpieczającym zjawisk dynamicznych. Jako reprezentatywne wybrano rejestracje ujęte charakterystykami nr: 1, 2, 3, 5, 11 i 17 zgodnie z (Sprawozdanie 2019a). Wybrane rejestracje przedstawiono w pracy na rysunkach 10.2-10.7.



Rys. 10.2. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy uderowej z wysokości 0,2 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15,0$ MPa dla próby 1 (zawór hydrauliczny SP10 przyłączony do płyty pośredniej); a) przebieg pełny, b) pierwszy zarejestrowany największy pik

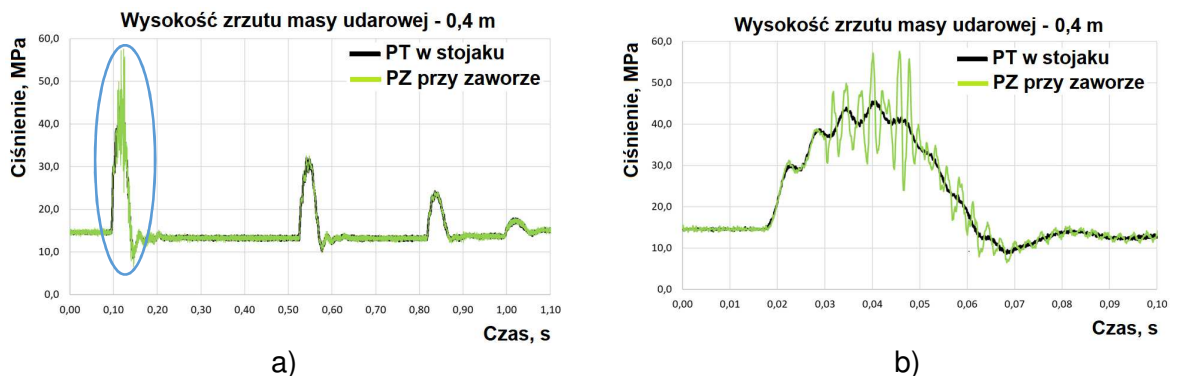


Rys. 10.3. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy uderowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15,0$ MPa dla próby 2 (zawór hydrauliczny SP10 przyłączony do płyty pośredniej); a) przebieg pełny, b) pierwszy zarejestrowany największy pik



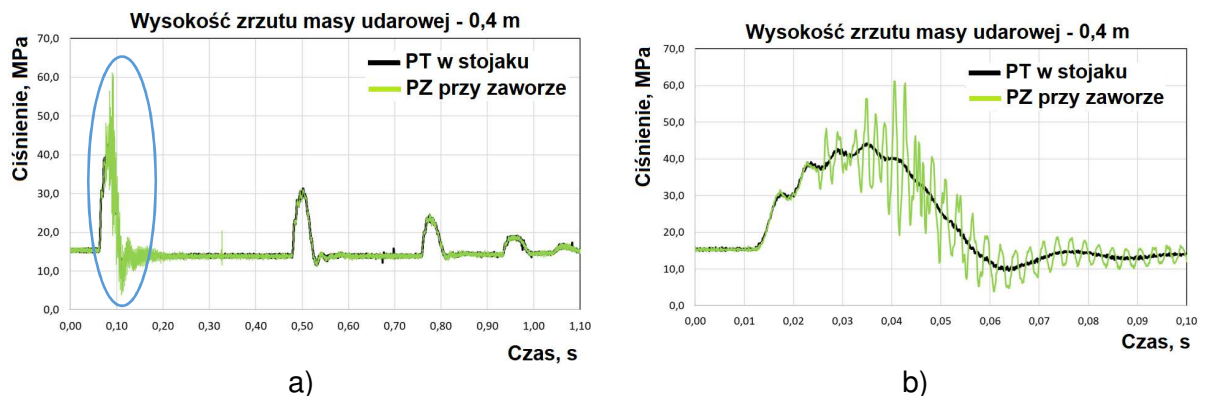
Rys. 10.4. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy uderowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15,0$ MPa dla próby 3 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do płyty pośredniej);

a) przebieg pełny, b) pierwszy zarejestrowany największy pik



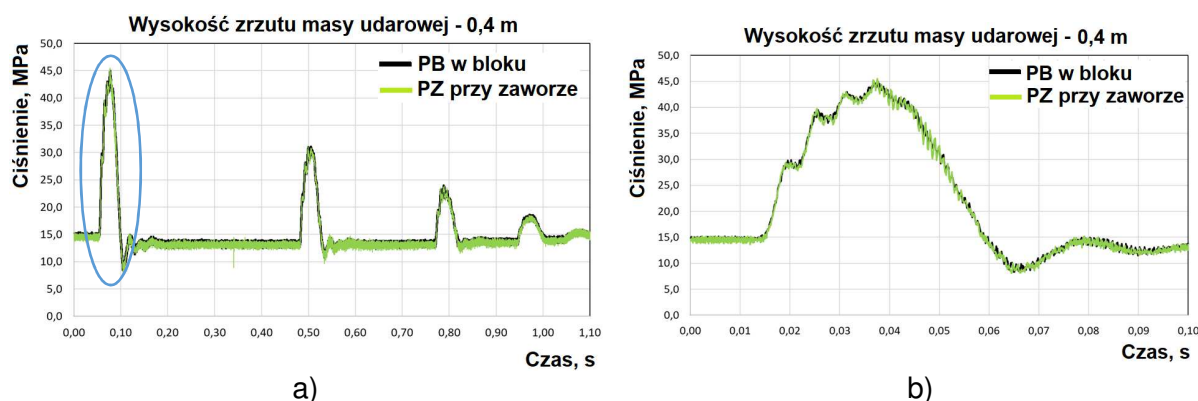
Rys. 10.5. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy uderowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15,0$ MPa dla próby 5 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do przyłącza długiego o średnicy 0,035/0,025 m);

a) przebieg pełny, b) pierwszy zarejestrowany największy pik



Rys. 10.6. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy uderowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15,0$ MPa dla próby 11 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do przyłącza długiego o średnicy 0,030/0,02 m);

a) przebieg pełny, b) pierwszy zarejestrowany największy pik



Rys. 10.7. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy uderowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15,0$ MPa dla próby 17 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do przyłącza krótkiego o średnicy 0,030/0,02 m); a) przebieg pełny, b) pierwszy zarejestrowany największy pik

Ocena wyników badania udarem masy modelowego stojaka

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych przystosowanego modelu stojaka o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m wynika, że przyłączenie zaworu hydraulicznego bezpośrednio do płyty pośredniej skutkuje powstawaniem pulsacji ciśnienia w układzie zabezpieczającym o amplitudach rzędu 90,0 MPa i częstotliwości kilkuset herców (rys. 10.2÷10.4). Można zauważyć, że znaczenie tutaj ma wysokość zrzutu masy uderowej, co łączy się z energią uderu (E_u), która przy zrzucie masy z wysokości 0,2 m jest dwukrotnie mniejsza ($E_u = 0,04$ MJ), niż w przypadku zrzutu masy z wysokości 0,4 m ($E_u = 0,08$ MJ).

Pulsacje ciśnienia występowały także w układach gdzie ciecz z przestrzeni roboczej stojaka wyprowadzana była zewnętrzną, długą rurką na końcu której zamontowano zawór hydrauliczny (rys. 10.5 i 10.6). Amplitudy ciśnień mierzone przy zaworze wynosiły około 58,0÷60,0 MPa i były o około 25% wyższe od ciśnień mierzonych w podtłoku stojaka (PT).

Najmniejsza dynamika ciśnień występowała w układzie gdzie ciecz z podtłoka stojaka (PT) doprowadzana była do zaworu najkrótszą drogą (krótka rurka przyłączeniowa). W tym przypadku niezależnie od zastosowanego rodzaju zaworu hydraulicznego, ciśnienia w przestrzeni podtłokowej stojaka były porównywalne z ciśnieniem mierzonym przy zaworze na końcu przyłącza krótkiego (rys. 10.7).

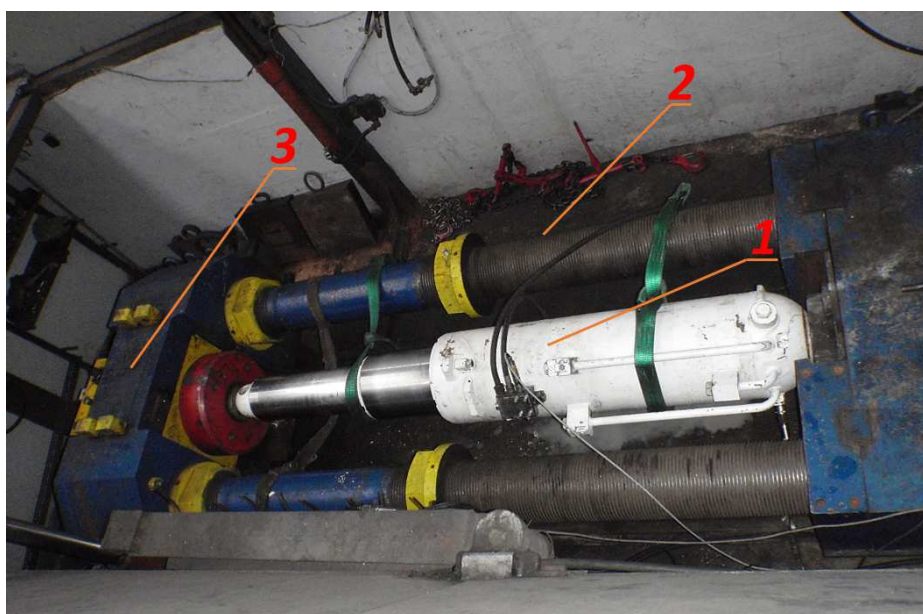
Ponadto nie stwierdzono wpływu działania zaworów hydraulicznych na ograniczenie ciśnienia w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT), niezależnie od ich przepływu oraz miejsca podłączenia w układzie zabezpieczającym. Można stwierdzić, że wpływ na niedostateczną skuteczność działania zaworów ograniczających ciśnienie

wynika ze stałych czasowych badanych zaworów w odniesieniu do prędkości narastania ciśnień.

Należałoby rozważyć wpływ stałych czasowych elementów układu na skuteczność działania zaworów ograniczających ciśnienie w przestrzeni podłokowej. Czas trwania pierwszego impulsu (zarejestrowanego największego pik) obciążenia dynamicznego stojaka wynosił około 40 ms, co można interpretować jako 1/2 okresu drgań układu stojak.

10.3. Badania modelowego stojaka o średnicy \varnothing 0,32 m z wykorzystaniem materiału wybuchowego

Badania pod obciążeniem dynamicznym modelu stojaka o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m (wg fot. 10.4) z wykorzystaniem materiału wybuchowego przeprowadzono w stanowisku w ITG KOMAG, Gliwice. Stanowisko badawcze wraz z badanym stojakiem przedstawiono na fotografii 10.10.



Fot. 10.10. Stanowisko badawcze w ITG KOMAG (źródło własne);
gdzie: 1 – badany stojak; 2 – śruby prowadzące; 3 – generator obciążenia

Do pomiarów i ich rejestracji wykorzystano następującą aparaturę pomiarową:

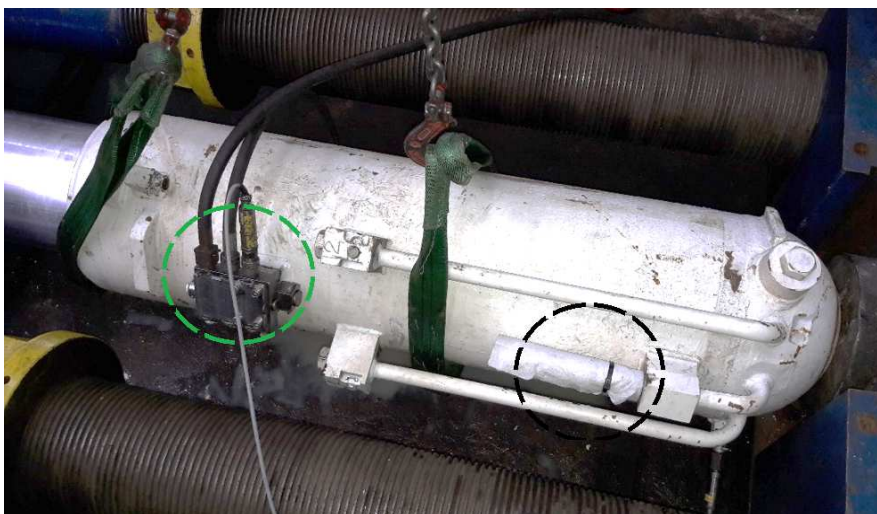
- laptop z oprogramowaniem,
- wzmacniacz „SPIDER 8”, firmy HBM o częstotliwość próbkowania 9600 Hz,
- przetworniki ciśnienia: Nr WPiB 483 (100 MPa), Nr WPiB 216 (200 MPa) i Nr WPiB 702 (200 MPa).

Warunki i przebieg badania.

Przystosowany do badań stojak (fot. 10.4) został rozparty w stanowisku z wysuwem I stopnia około 0,305 m oraz II stopnia około 0,623 m. Ciśnienie wstępnego rozparcia stojaka wynosiło 30,0 MPa. Przy każdej próbie badawczej stojak wyposażony był w odpowiednie elementy hydrauliczne, przetworniki pomiarowe i aparaturę rejestrującą. Podczas przeprowadzania prób badawczych stojak obciążany był z generatora obciążenia wykorzystującego materiał wybuchowy (dąb - 300 gram i wiśnia - 5 gram – materiały wybuchowe stosowane w ITG KOMAG). W każdym badaniu ciśnienie rejestrowane było w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) oraz na wejściu do badanego zaworu hydraulicznego ograniczającego ciśnienie (PZ).

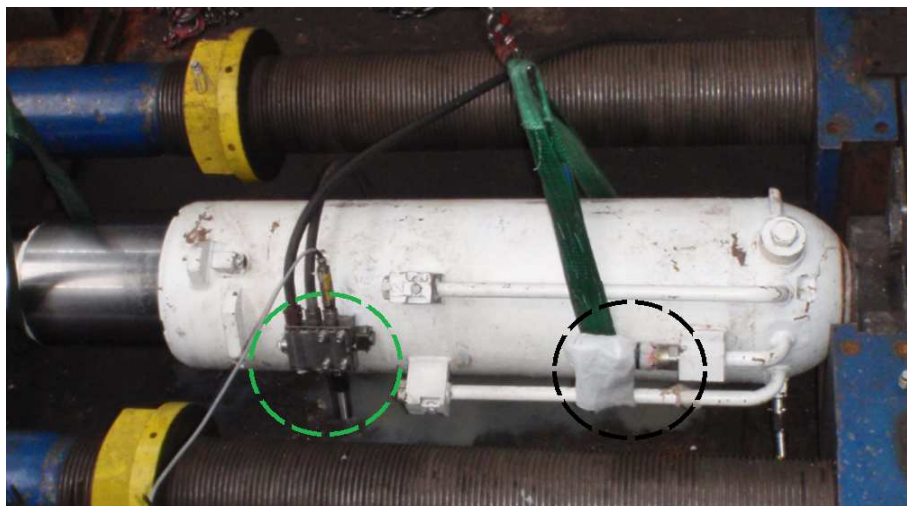
Ogólnie przebadano pięć wariantów połączeń elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak a mianowicie:

- Wariant pierwszy: zawór hydrauliczny podłączony do krótkiego przyłącza o średnicy rurki 0,03/0,02 m. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym (PZ i PT) oraz w bloku stojakowym (PB) – fotografia 10.11.



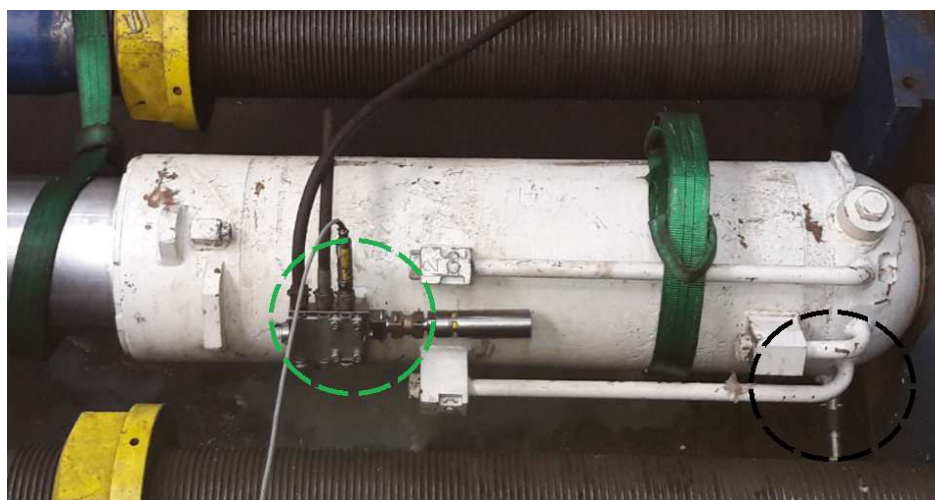
Fot. 10.11. Wariant pierwszy połączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant drugi: zawór hydrauliczny podłączony do krótkiego przyłącza o średnicy rurki 0,03/0,02 m oraz do bloku stojakowego. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym podłączony do przyłącza (PZ = PT) oraz przy zaworze hydraulicznym podłączonym do bloku stojakowego (PB) – fotografia 10.12.



Fot. 10.12. Wariant drugi podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant trzeci: zawór hydrauliczny podłączony bezpośrednio do płyty pośredniej. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym (PZ) oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) – fotografia 10.13.



Fot. 10.13. Wariant trzeci podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant czwarty: zawór hydrauliczny podłączony do przyłącza długiego o średnicy rurki 0,03/0,02 m. Czujnik ciśnienia przy zaworze hydraulicznym (PZ) oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) – fotografia 10.14.



Fot. 10.14. Wariant czwarty podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

- Wariant piąty: zawór hydrauliczny podłączony do przyłącza długiego o średnicy rurki 0,03/0,02 m oraz do bloku stojakowego. Czujnik ciśnienia przy każdym zaworze hydraulicznym (PZ_1 i PZ_2) oraz w przestrzeni podtłokowej stojaka (PT) – fotografia 10.15.



Fot. 10.15. Wariant piąty podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak (źródło własne)

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnień, w badanym układzie zabezpieczającym, w postaci plików ASCII, wykorzystując program Excel z pakietu Microsoft Office sporządzono wykresy przedstawiające pełny zarejestrowany przebieg ciśnienia w funkcji czasu. Zbiorcze wyniki badań zebrano w tablicy 10.2, zgodnie z (Sprawozdanie 2019b).

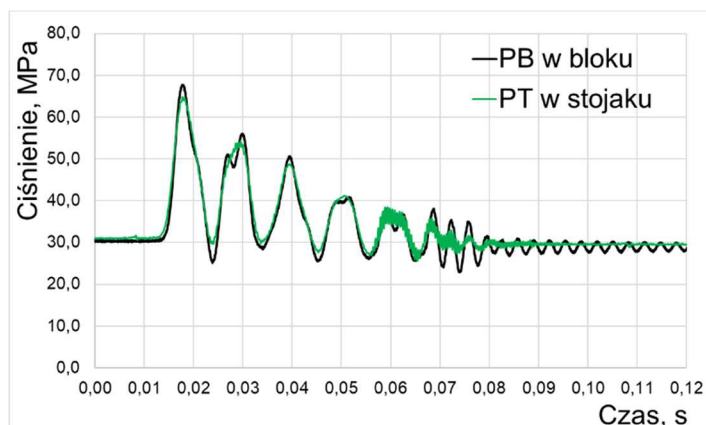
Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że stojak, zawór hydrauliczny SP10 oraz blok stojakowy, wykorzystane w badaniach, pozostały sprawne technicznie

i szczelne. Zawory hydrauliczne: SP7, SP12 i SP14 wykazały niedostateczną szczelność, według wymagań normy.

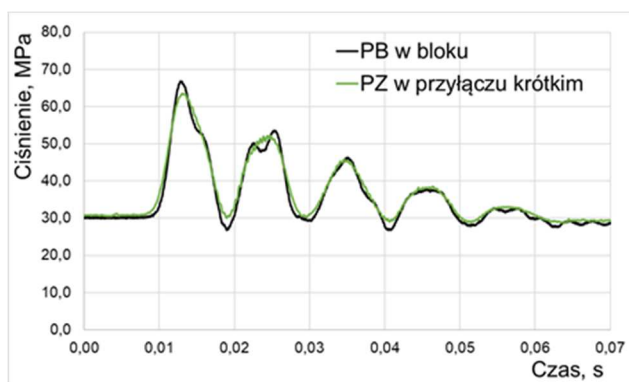
Tablica 10.2. Zbiorcze wyniki przeprowadzonych badań modelu stojaka pod obciążeniem dynamicznym z wykorzystaniem metody wybuchowej (użyty materiał wybuchowy: 300 g dąb i 5 g wiśnia, wysuw I stopnia stojaka 0,305 m, wysuw II stopnia stojaka 0,623 m) (Sprawozdanie 2019b)

Nr próby	Przyłączenie zaworów ograniczających ciśnienie	Typ zaworu	P_{wst} , MPa	Max. Ciśnienie w podłoku stojaka PT, MPa	Max. ciśnienie przy zaworze, PZ, MPa	Max. ciśnienie przy zaworze w bloku, PZ, MPa	Maksymalne ciśnienie w bloku, PB, MPa	Prezentacja przebiegu ciśnień P(t) – nr char.
Podłączenie przetworników: PT stojaka oraz do bloku stojakowego								
1	bez zaworu, strzał próbny	–	30,0	64,0	–	–	67,0	Char. 1
2	Do przyłącza krótkiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m. Wariant pierwszy, fot. 10.10.	SP12	30,0	63,5	63,5	–	66,8	Char. 2
3	Do przyłącza krótkiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m oraz do bloku stojakowego. Wariant drugi, fot. 10.11.	SP14	30,0	63,5	63,5	–	66,81	Char. 3
4	Do przyłącza krótkiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m oraz do bloku stojakowego. Wariant drugi, fot. 10.11.	SP14 w przyłączy krótkim oraz SP7 w bloku stojakowym	30,0	63,20	63,20	103,8	–	Char. 4 i Char. 4a
5	Do przyłącza krótkiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m oraz do bloku stojakowego. Wariant drugi, fot. 10.11.	SP14 w przyłączy krótkim oraz SP10 w bloku stojakowym	30,0	62,63	62,63	100,41	–	Char. 5
Podłączenie przetworników: PT stojaka oraz w bloku								
6	Do płyty pośredniej. Wariant trzeci, fot. 10.12.	SP10	30,0	62,41	97,48	–	–	Char. 6
7	Do płyty pośredniej. Wariant trzeci, fot. 10.12.	SP12	30,0	63,22	91,68	–	–	Char. 7
Podłączenie przetworników: PT stojaka oraz przy zaworze oraz przy bloku stojakowym								
8	Do przyłącza długiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m. Wariant czwarty, fot. 10.13.	SP12 w przyłączy długim	30,0	63,53	95,28	63,03	–	Char. 8
9	Do przyłącza długiego z rurką o średnicy 0,03/0,02 m oraz do bloku stojakowego. Wariant piąty, fot. 10.14.	SP12 w przyłączy długim oraz SP10 w bloku stojakowym	30,0	63,15	104,3	–	105,82	Char. 9

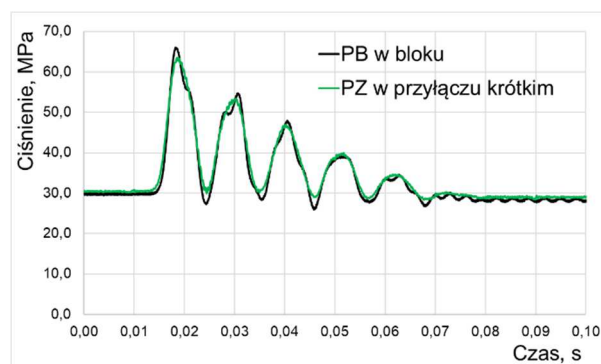
W niniejszej pracy tablicę 10.2 uzupełniono wybranymi, zarejestrowanymi przebiegami ciśnień, pozwalającymi ocenić wpływ sposobu przyłączenia zaworu na występowanie w układzie zabezpieczającym zjawisk dynamicznych. Jako reprezentatywne wybrano rejestracje ujęte charakterystykami nr: 1, 2, 3, 4, 5, 7 i 9 zgodnie z (Sprawozdanie 2019b). Wybrane rejestracje przedstawiono w pracy na rysunkach 10.8-10.12.



Rys. 10.8. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa, dla próby 1, (czujniki ciśnienia zamontowane w bloku stojakowym oraz w podtłoku stojaka (PT), bez zaworu hydraulicznego)



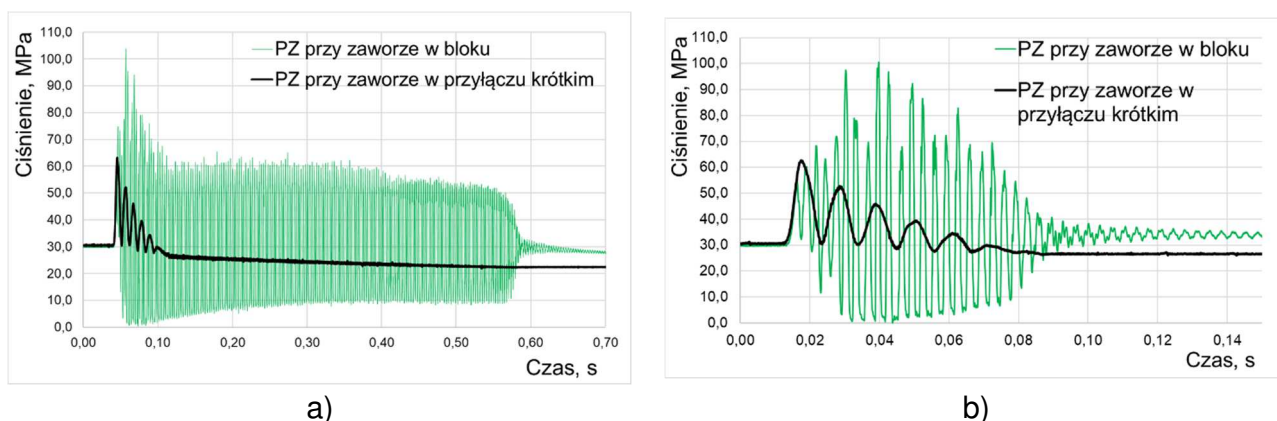
a)



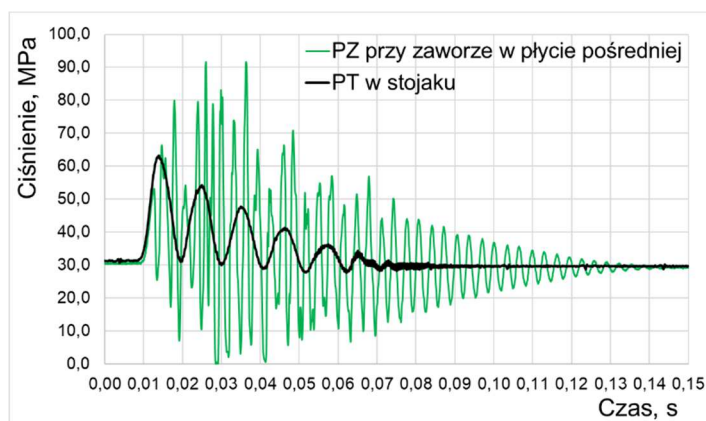
b)

Rys. 10.9. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa;

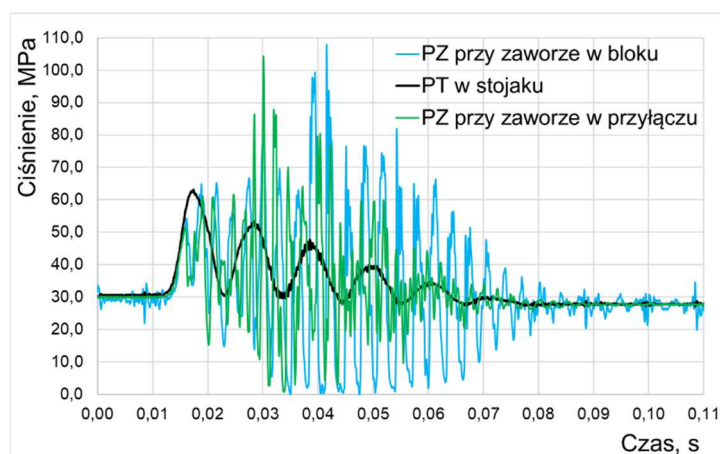
a) dla próby 2 (Zawór SP12 przyłączony do przyłączy krótkiego), b) dla próby 3 (Zawór SP14 przyłączony do przyłączy krótkiego)



Rys. 10.10. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa; a) dla próby 4 (Zawór SP14 przyłączony do przyłączy krótkiego i zawór SP7 przyłączony do bloku stojakowego), b) dla próby 5 (Zawór SP14 przyłączony do przyłączy krótkiego i zawór SP10 przyłączony do bloku stojakowego)



Rys. 10.11. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa, dla próby 7, (Zawór SP12 przyłączony do płyty pośredniej)



Rys. 10.12. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa, dla próby 7, (Zawór SP12 przyłączony do przyłączy długiego i zawór SP10 przyłączony do bloku stojakowego)

Ocena wyników badań dynamicznych z wykorzystaniem materiału wybuchowego.

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych przystosowanego modelu stojaka o średnicy I stopnia $\varnothing 0,32$ m wynika, że przyłączenie zaworu tak do płyty jak również do bloku stojakowego skutkowało powstawaniem drgań w układzie, zabezpieczającym stojak, o częstotliwościach kilkuset herców i amplitudach ciśnienia około $90,0 \div 110$ MPa (rys. 10.10 i 10.11). Amplitudy ciśnień mierzone przy zaworach hydraulicznych były wyższe o około 40% od ciśnień mierzonych w podtłoku stojaka (PT).

Pulsacje ciśnienia występowały także w układach gdzie ciecz z przestrzeni roboczej stojaka wyprowadzana była zewnętrzną, długą rurką na końcu której zamontowano zawór hydrauliczny (rys. 10.12). W tym przypadku wzbudzenia układu występowały z częstotliwością około 300 Hz, a wartości ciśnień osiągały poziom rzędu 110,0 MPa. Jest to przypadek bardzo niebezpieczny dla zastosowanego układu, spowodowany najprawdopodobniej bardzo krótkim czasem działania obciążenia dynamicznego na stojak.

Najmniejszą tendencję do wzbudzania się wykazują układy w których ciecz z podtłoku stojaka (PT) wyprowadzana jest na zewnątrz najkrótszą drogą (krótka rurka przyłączeniowa). W tym przypadku nie zaobserwowano szczególnie istotnych różnic w mierzonych ciśnieniach przy zaworze oraz w bloku stojakowym (rys. 10.9).

Dodatkowo należy zaznaczyć, że zadziałanie zaworów hydraulicznych, niezależnie od ich przepływu oraz miejsca podłączenia w układzie zabezpieczającym, nie miało znaczącego wpływu na ograniczenie ciśnienia w przestrzeni podtłokowej (PT) stojaka. Wynikać to może ze zbyt krótkiego czasu działania obciążenia na stojak (okres drgań układu około 15 ms) w odniesieniu do stałych czasowych układu.

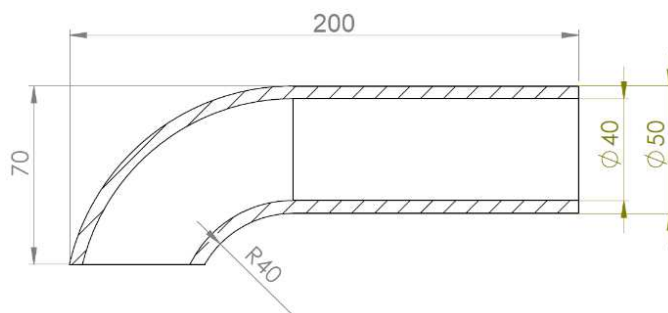
11. MODERNIZACJA UKŁADU ZABEZPIEZAJĄCEGO SEKCJE ZE STOJAKAMI O ŚREDNICY I STOPNIA $\varnothing 0,32$ I $\varnothing 0,37$ M

Modernizacja układu zabezpieczającego sekcje została zaproponowana celem pełnego wykorzystania możliwości podpornościowych sekcji analizowanych obudów po wprowadzonych ograniczeniach, spowodowanych występującymi uszkodzeniami układów sterujących (rozdział 8 pracy). Proponuje się dokonania jej podczas remontów sekcji obudów ze stojakami o średnicy I stopnia $\varnothing 0,32$ i $0,37$ m, przewidzianych po okresie gwarancyjnym. Postępowanie takie jest celowe z uwagi na minimalizację kosztów modernizacyjnych. Modernizacja będzie obejmowała: stojak hydrauliczny, układ sterowania oraz ustalenie nowych parametrów roboczych sekcji wraz z ich upodatnieniem.

Proponowana modernizacja pozwoli ujednolicić sekcje obudów zmechanizowanych posiadających stojaki z wierconymi płaszczami cylindrów w aspekcie bezpieczeństwa ich stosowania (wyeliminowanie występowania uszkodzeń elementów hydrauliki oraz zapewnienie poprawnych warunków utrzymania stropu w ścianie).

11.1. Modernizacja stojaka hydraulicznego

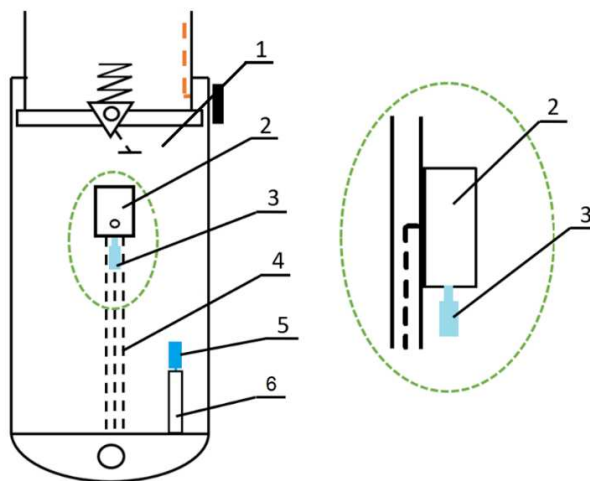
Modernizowane stojaki hydrauliczne o średnicach I stopnia $\varnothing 0,32$ i $0,37$ m, z wierconymi płaszczami cylindrów, zostaną wyposażone w jednakowe przyłącze, dla podłączenia zaworu hydraulicznego dodatkowego, które schematycznie przedstawiono na rysunku 11.1. Przyłącze zaproponowano na podstawie przeprowadzonej w pracy analizy numerycznej przepływów, przeprowadzonych badań stanowiskowych oraz wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych. Przyłącze wyposażone będzie w gniazdo M40x2.



Rys. 11.1. Przyłącze stojakowe dla podłączenia zaworu dodatkowego

W zmodernizowanych stojakach bezpośrednio w miejscu wyprowadzeń wierceń w płaszczu cylindra I stopnia podłączony zostanie blok stojakowy (zawór zwrotny

sterowany podłączony na przylgę). W podtłoku (PT) stojaka zostanie zamontowane zaprojektowane przyłącze wg rysunku 11.1, do którego podłączony zostanie zawór hydrauliczny dodatkowy. Zmodernizowany stojak z zaproponowanym przyłączem ujmuje rysunek 11.2.



Rys. 11.2. Schemat poglądowy zmodernizowanego stojaka; gdzie: 1 – I-szy stopień stojaka hydraulicznego, 2 – blok stojakowy, 3 – zawór roboczy, 4 – wiercenia w cylindrze I stopnia stojaka, 5 – zawór dodatkowy, 6 – przyłącze dla zaworu dodatkowego o średnicy wewnętrznej rurki minimum 0,04 m

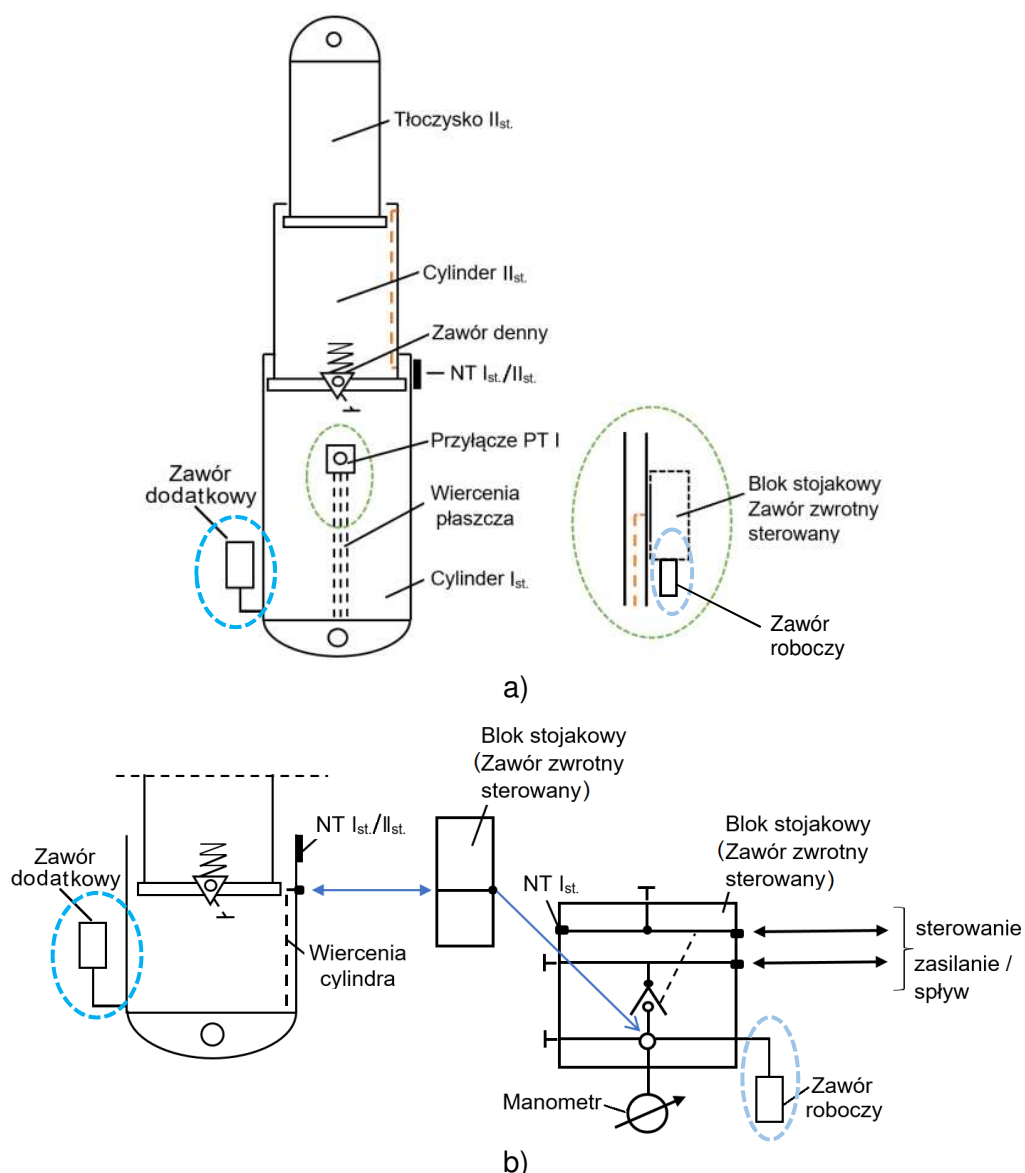
Przewiduje się również ustalenie jednolitych ciśnień dla stojaków z wierconymi płaszczami cylindrów i wynosić one będą:

- ciśnienie wstępne $P_w = 25,0 \div 32,0$ MPa,
- ciśnienie nominalne $P_N = 42,0$ MPa.

Analizowane stojaki hydrauliczne posiadają rezerwy podpornościowe przy tak przyjętych ciśnieniach. Zaznacza się jednak, że wprowadzenie jednolitych dla stojaków ciśnień wymagać będzie uzupełnienia badań WE dla każdej odmiany stojaka.

11.2. Układ sterowania dla modernizowanych sekcji

Dla modernizowanych sekcji przyjęto zasadę, że przyłącze stojakowe wykorzystujące wiercenia w cylindrze stojaka wykorzystane będzie jedynie do podłączenia bloku stojakowego, ciśnieniomierzy, zaworów roboczych i innych czujników do kontroli parametrów pracy sekcji. Zawór dodatkowy przyłączany będzie do dodatkowego przyłącza, przedstawionego schematycznie na rysunku 11.1. Ujednolicony proponowany układ hydrauliczny stojaka przedstawiono na rysunku 11.3. Ukierunkowany jest głównie na sterowanie hydrauliczne bezpośrednio przylgę, może zostać rozszerzony na przesuwanie sekcji w kontakcie ze stropem (konieczna wymiana bloku stojakowego).



Rys. 11.3. Proponowany ujednoczony układ hydrauliczny przeznaczony dla sekcji z wierconymi stojakami o średnicy I stopnia $\varnothing 0,32$ oraz $\varnothing 0,37$ m;
a) schemat poglądowy stojaka, b) schemat poglądowy układu sterowania stojakiem

11.3. Parametry robocze dla modernizowanych sekcji

Modernizowane sekcje obudów przeznaczone są do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, powinny zatem spełniać warunki wynikające z oceny upadnienia. Na ocenę upadnienia wpływ mają oprócz warunków górniczych parametry techniczne sekcji takie jak: geometria sekcji, budowa stojaka, podporności (wstępna, robocza, nominalna), zabezpieczenia przed przeciążeniami. W analizowanym przypadku na geometrię sekcji jak również budowę stojaka nie mamy wpływu, jest wyprodukowana i użytkowana. Mamy natomiast, w dopuszczalnym zakresie, wpływ na podporności stojaka, w szczególności ich wzajemne proporcje oraz wartości przepływów w układach zabezpieczających stojak przed przeciążeniem.

Na podstawie wieloletnich doświadczeń z ocen upodatnienia sekcji obudów, prowadzonych przez GIG, dla warunków zagrożenia wstrząsami górotworu, proponuje się ujednoczone parametry podpornościowe stojaka określone wartościami ciśnień:

- ciśnienie wstępne/robocze/nominalne – 25,0/38,0/42,0 MPa,
- ciśnienie nastawy zaworu dodatkowego – 42,0 MPa.

Podane wartości ciśnień i odpowiadające im podporności stojaka są najczęściej stosowane w aktualnie eksploatowanych sekcjach obudów zmechanizowanych. Do proponowanych ciśnień są najlepiej przygotowane systemy zasilania obudów oraz dostępne na rynku elementy wyposażenia hydrauliki sterującej.

Przepływy w proponowanym układzie zabezpieczającym stojak przed przeciążeniem, składają się z przepływu zaworu hydraulicznego ograniczającego ciśnienie stojaka obciążonego w sposób wolnozmienny (powolne zaciskanie wyrobiska) oraz z przepływu zaworu hydraulicznego dodatkowego ograniczającego ciśnienie stojaka obciążonego z dużą dynamiką (jako następstwo wstrząsu górotworu).

Oczekiwane przepływy zaworów przyjęto:

- dla sekcji ze stojakami o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m:
 - zawór roboczy ($P_r = 38,0$ MPa) o przepływie ≥ 100 dm³min⁻¹ wg PN EN;
 - zawór dodatkowy ($P_r = 42,0$ MPa) o przepływie ≥ 400 dm³min⁻¹ dla ciśnienie równego 1,5 krotności P_r tj. 57 MPa;
- dla sekcji ze stojakami o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m:
 - zawór roboczy ($P_r = 38,0$ MPa) o przepływie ≥ 150 dm³min⁻¹;
 - zawór dodatkowy ($P_r = 42,0$ MPa) o przepływie ≥ 600 dm³min⁻¹ dla ciśnienie równego 1,5 krotności P_r tj. 57 MPa.

Przepływ zaworów roboczych przyjęto na podstawie wytycznych zawartych w normie PN EN 1804-3+A1:2012 (minimalny przepływ zaworu roboczego ≥ 60 dm³min⁻¹). Przepływ zaworu dodatkowego określono na podstawie wzoru (Stoiński, Kostyk 2005, Stoiński i inni 2018):

$$Q_{zaw.} \geq S_s \cdot V_z \cdot 6 \cdot 10^4 \frac{1}{\cos \alpha}, dm^3 \cdot min^{-1} \quad 11.1$$

Gdzie:

S_s – powierzchnia przekroju zabezpieczonej przestrzeni roboczej stojaka, m²;

V_z – przyjęta prędkość zaciskania wyrobiska jako współczynnika dociążenia, m·s⁻¹;

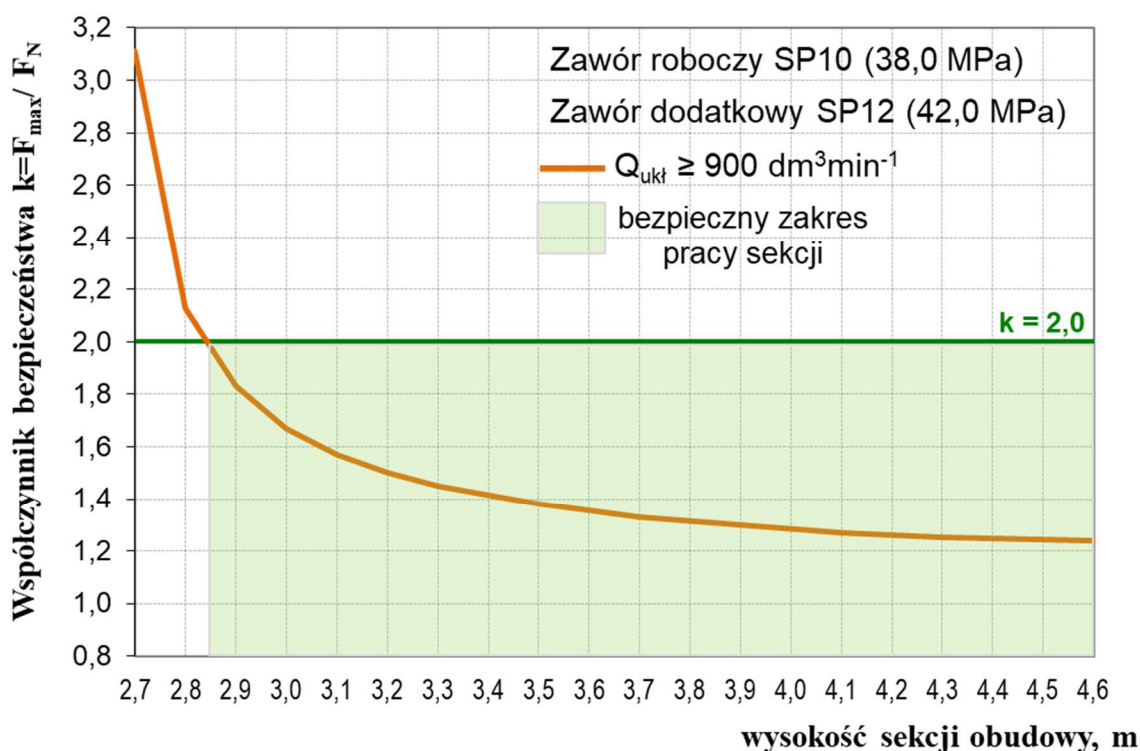
α – kąt nachylenia stojaka dla wysokości roboczej obudowy

Podane oczekiwane przepływy zaworów są wartościami przybliżonymi. Ich ciśnienie nastawy będzie wynikać z opracowanego upodatnienia sekcji,

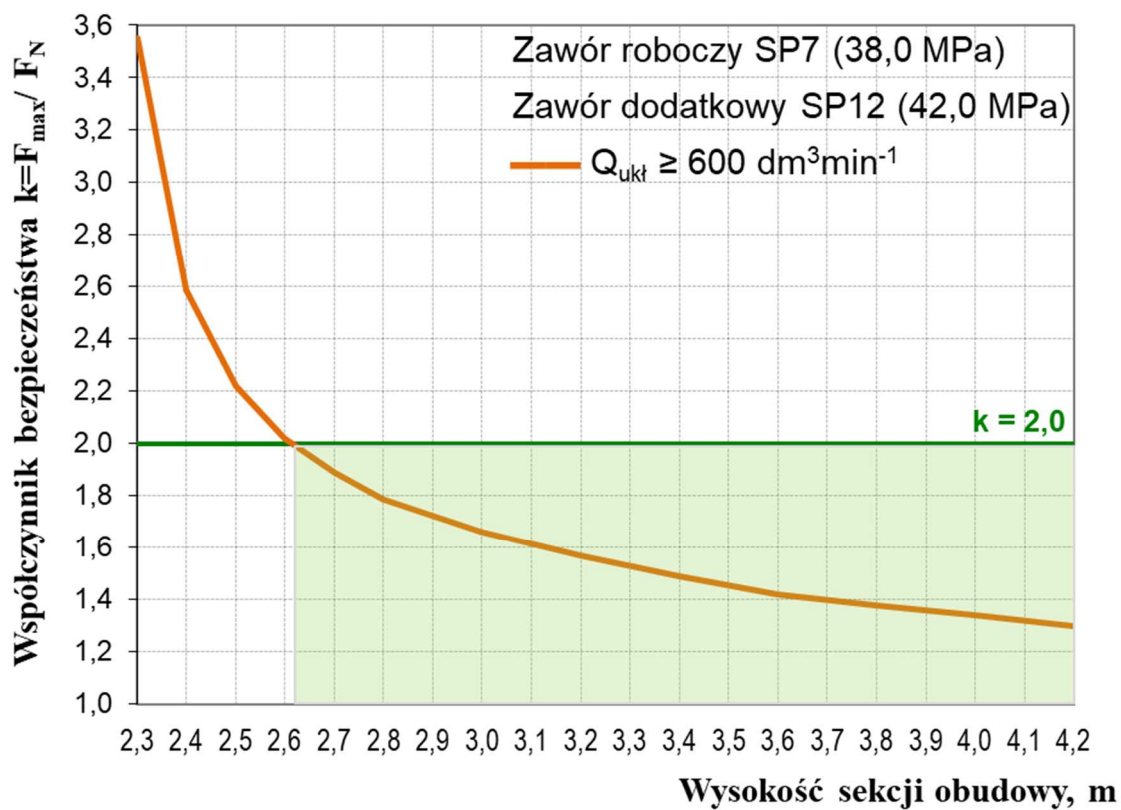
uwzględniające warunki geologiczno-górniczne oraz określonego bezpiecznego zakresu pracy sekcji obudowy.

Na rysunku 11.4 i 11.5 przedstawiono przykładowe obliczenia przypadku upodatnienia sekcji dla przyjętych parametrów:

- współczynnik dociążenia obudowy $n_{tz} = 1,30$,
- średnica stojaka I stopnia równa $\varnothing 0,37$ m (rys. 11.4) i $\varnothing 0,32$ m (rys. 11.5),
- podporności dla analizowanej sekcji: $F_w / F_r / F_N = 25,0 / 38,0 / 42,0$ MPa.



Rys. 11.4. Przykładowa charakterystyka upodatnienia sekcji IV (po modernizacji) przy parametrach roboczych $P_w / P_r / P_N = 25,0 / 38,0 / 42,0$ MPa oraz zastosowaniu zaworu roboczego SP10 oraz dodatkowego SP12



Rys. 11.5. Przykładowa charakterystyka upodatkowania sekcji III (po modernizacji) przy parametrach roboczych $P_w / P_r / P_N = 25,0 / 38,0 / 42,0$ MPa oraz zastosowaniu zaworu roboczego SP7 oraz dodatkowego SP12

12. KONCEPCJA BADAŃ MODELOWYCH STOJAKÓW O DUŻYCH ŚREDNICACH I STOPNIA

Metoda upodatnienia sekcji obudowy zmechanizowanej GIG jest metodą analityczną opartą na modelu o jednym stopniu swobody i stałych skupionych. Dodatkowo przyjęto, że stała czasowa układu hydraulicznego jest znacznie mniejsza od okresu drgań układu oraz sztywność cieczy jest niezależna od prędkości zmian ciśnienia. Dla tak przyjętego modelu odpowiedzią na obciążenie jest przebieg sinusoidalny. W przypadku uwzględniania strat i dużego tłumienia przebieg ten może przejść w aperiodyczny. Duże tłumienie w modelu wprowadzają układy zabezpieczające stojak przed przeciążeniem. Tłumienie w dużym stopniu uzależnione jest od wartości przepływów masowych zabezpieczających stojak, jako funkcja ciśnienia w stojaku. Zależności te są nieliniowe i trudne do opisu analitycznego. Pomocą w ocenie upodatnienia dla szczególnych przypadków np. dla stojaków o bardzo dużych średnicach pierwszego stopnia, są badania w stanowiskach laboratoryjnych.

Obecnie badania takie przeprowadza się dla potrzeb oceny upodatnienia w sposób analityczny (wg metody GIG), przy wykorzystaniu obciążenia udarem masy (stanowisko w GIG oraz w TLO Opawa) oraz z wykorzystaniem materiału wybuchowego (stanowisko w ITG KOMAG). Uzyskane wyniki wg wymienionych trzech sposobów badań różnią się jednak znacznie między sobą, z uwagi na prędkości narastania ciśnienia w badanym stojaku oraz wartości okresów drgań. Przykładowe wyniki z przeprowadzonych badań uzyskanych z badań analitycznych i laboratoryjnych zebrano w Tablicy 12.1., Dodatkowo tablicę uzupełniono o wyniki badań pozyskane z literatury (Sprawozdanie 1994; 2019; 2019b; Shein 2002; Szweda 2004).

Tablica 12. 1. Zestawienie prędkości narastania ciśnień w stojaku oraz wartości połowy okresu drgań

Przedmiot i metoda badania	Prędkość narastania ciśnień [MPa]	Okres drgań T [ms]	Opis wybranego przypadku
Upodatnienia wg GIG dla stojaka Ø 0,32/0,23 m	~270	~410	Masa uderowa powiązana z podpornością stojaka i współczynnikiem dociążenia n_{tz} . Przyłączenie zaworu powoduje przejście w przebieg aperiodyczny o mniejszej amplitudzie.
Badania udarem masy stojaka Ø 0,32/0,23 m	~1600	~106	Masa uderowa 20 Mg. Przyłączenie zaworu nie wpływa na przebieg ciśnienia w podłoku stojaka PT.
Badania materiałem wybuchowym stojaka Ø 0,32/0,23 m	~7300	~13	Przyłączenie zaworu nie wpływa na przebieg ciśnienia w podłoku stojaka.
Badania udarem masy stojaka Ø 0,2 m	~400	~260	Masa uderowa powiązana z podpornością stojaka (100 Mg). Przyłączenie zaworu powoduje przejście w przebieg aperiodyczny o mniejszej amplitudzie drgań.
Badania „in situ” wg Szwedy (2004)	~300	~120	Badanie przeprowadzono podczas rejestracji zjawisk dynamicznych w warunkach górnictwa polskiego.
Badania „in situ” wg Sheina (2002)	~50	~100	Badanie przeprowadzono podczas rejestracji tąpnięć w Kopalni głębinowej w Zagłębiu Bałtyckim.

Na podstawie tablicy 12.1. można przyjąć, że wyniki badań uzależnione są od sposobu obciążenia stojaka i różnią się znacznie w analizowanych przypadkach, głównie w zależności od wartości masy obciążającej badany układ (sekcję lub stojak). Jest to zgodne z zasadą, że wynik badania zależy od charakterystyki dynamicznej badanego obiektu (sekcje, stojak), ale również od przebiegu obciążenia w czasie, co można przedstawić ogólną zależnością:

$$k_k(t) = k_s(t) * k_{ob}(t) \quad (12.1)$$

gdzie:

$k_k(t)$ – wynik przeprowadzonego badania,

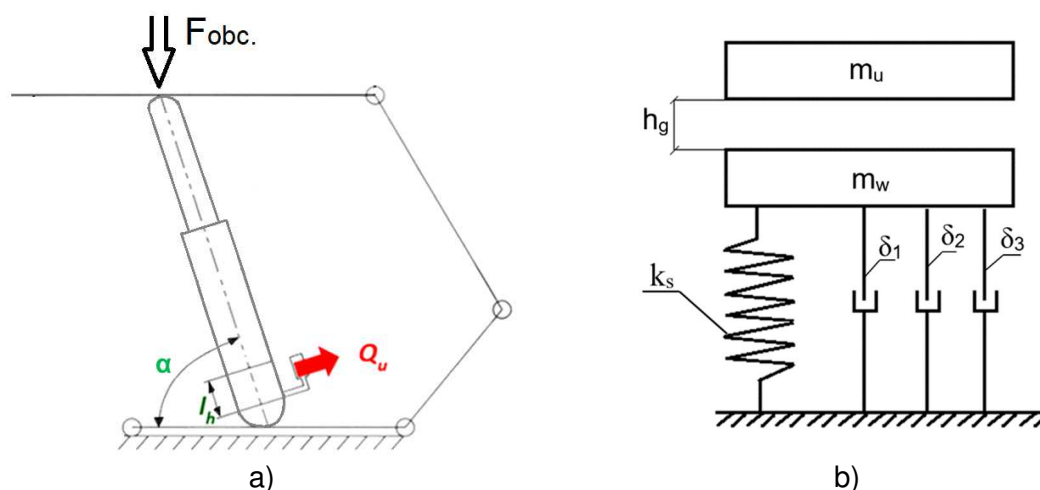
$k_s(t)$ – charakterystyka dynamiczna badanego obiektu (sekcja, stojak),

$k_{ob}(t)$ – charakterystyka obciążenia dynamicznego,

* – splot funkcji (iloczyn dwóch funkcji zależnych od czasu).

Charakterystykę dynamiczną badanego układu (modelu) możemy wyznaczyć analitycznie mając jego parametry techniczne. Dynamiczne obciążenie badanego obiektu (sekcja, stojak), jako następstwo wstrząsu górotworu, przyjmuje się najczęściej jako udar masy. Z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych („*in situ*”) w ścianach zagrożonych wstrząsami górotworu obserwuje się niekiedy inny sposób obciążenia, oceniany jako gwałtowne zaciśnięcie wyrobiska czy drgania górotworu. Przypadki takie są sporadyczne i związane często z zawisaniem stropu przy eksploatacji prowadzonej na zawal.

Do dalszych analiz przyjęto, że dynamiczne obciążenie wskutek wstrząsu górotworu ma postać udaru masy. Wartość tej masy będzie powiązana z podpornością stojaka i współczynnikiem dociążenia n_{tz} . Uwzględniając rzeczywiste układy hydrauliczne (z jednym lub dwoma zaworami) zabezpieczające stojak przed przeciążeniem, model i schemat obliczeniowy przyjmuje postać:



Rys. 12. 1. Model i schemat obliczeniowy górotwór - obudowa, gdzie: m_w – masa obciążająca wstępnie ($m_w = F_w/g$), m_u – masa dociążająca ($m_u = (F_r \cdot n_{tz} - F_w)/g$), k_s – sztywność stojaka, δ – tłumienie układu, h_g – przemieszanie się masy udarowej

Zmodyfikowana zależność będzie funkcją dwóch zmiennych t i Q i będzie miała postać:

$$f(t, Q) = F_w - F_d(1 + k_d \cdot e^{-\delta_z(Q)t} \sin(\omega t - \varphi)), N \quad 12.2$$

gdzie:

F_w – obciążenie wstępne, N ;

F_d – obciążenie dynamiczne, N ;

k_d – współczynnik obliczeniowy,

$\delta_z(Q)$ – tłumienie zależne od wartości przepływu w układzie zabezpieczającym stojak przed przeciążeniem, jako funkcja ciśnienia w stojaku.

$$\delta_z(Q) = \delta_1 + \mathbf{1}(P_{zr})\delta_2 + \mathbf{1}(P_{zd})\delta_3, s^{-1} \quad 12.3$$

gdzie:

δ_1 – tłumienie stałe związane ze stratami w badanym układzie,

δ_2 – obliczone tłumienie na podstawie charakterystyki przepływu zaworu roboczego (w postaci wielomianu wykładniczego – patrz rozdział 7, punkt 7.2.),

δ_3 – obliczone tłumienie na podstawie charakterystyki przepływu zaworu dodatkowego (w postaci wielomianu wykładniczego),

P_{zr} – ciśnienie otwarcia zaworu roboczego, Pa;

P_{zd} – ciśnienie otwarcia zaworu dodatkowego, Pa;

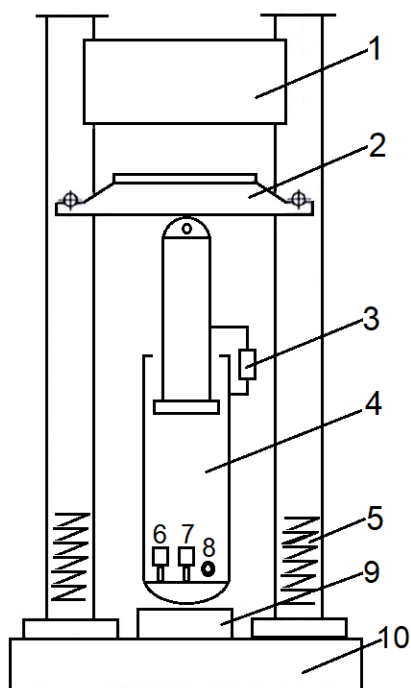
$\mathbf{1}(P_{zr}); \mathbf{1}(P_{zd})$ – funkcja która przyjmuje wartość **0** dla $P \leq P_{zr}$ i P_{zd} , i wartość **1** dla $P > P_{zr}$ i P_{zd} .

Obliczenie funkcji $f(t, Q)$ można dokonać zakładając bardzo mały krok obliczeniowy, np. 0,1 ms i przyjmując warunki brzegowe do obliczenia n-tego kroku z kroku n-1.

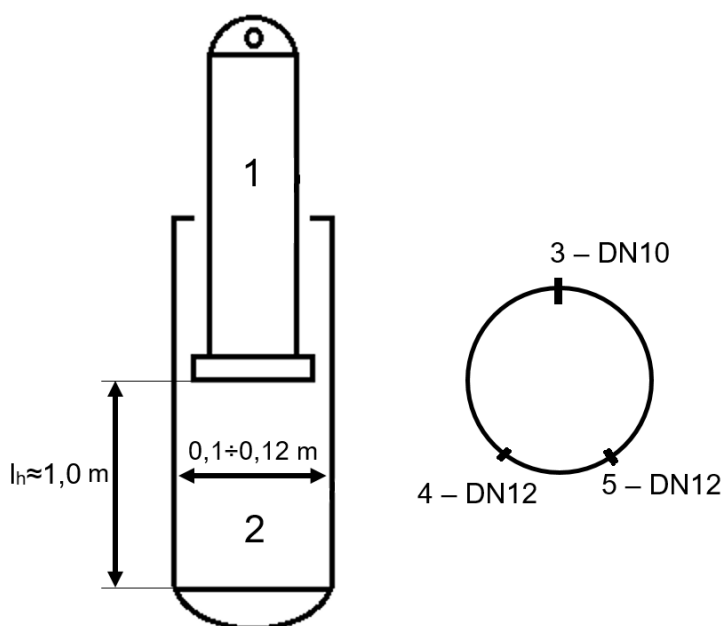
Według zaproponowanej procedury można obliczyć przeciążenie sekcji wskutek wstrząsu górotworu, można również obliczyć przebieg obciążenia stojaka z zaworami, przyjmując odpowiednią masę udarową i wysokość jej swobodnego spadku.

Uzupełnieniem przedstawianego sposobu obliczeń jest przewidziane badanie laboratoryjne z wykorzystaniem modeli fizycznych w pomniejszonej skali. Jako obciążenie można wykorzystać urządzenie kafarowe będące na wyposażeniu GIG. Model do badań powinien być stojakiem jednoteleskopowym o podwyższonej wytrzymałości na wyboczenie, o skoku hydraulicznym około 1,0 m i średnicy tłoka w zakresie od 0,1 do 0,12 m. Przyjęcie podanej średnicy stojaka umożliwia przeprowadzenie badań modelowych w pomniejszonej skali tj. od 1:5 do 1:10 w odniesieniu do stojaków o średnicach \varnothing 0,32÷0,42 m. Wielkościami stałymi dla modelu w skali naturalnej oraz pomniejszonej przyjęto: ciśnienie cieczy w stojakach, sztywność cieczy oraz czas. Pozostałe parametry będą przeliczane według skali przyjętej dla analizowanego modelu. Przewiduje się podczas badania modelu obciążonego udarem masy rejestrację następujących parametrów: siły oddziaływania masy udarowej na badany model stojaka, ciśnienie w stojaku oraz jego zsuw. Częstotliwość próbkowania powinna być utrzymywana na poziomie 9,6 kHz (jak stosowana dotychczas w badaniach).

Schemat poglądowy stanowiska prezentuje rysunek 12.2, zaś na rysunku 12.3 przedstawiono schemat poglądowy wzorcowego stojaka.



Rys. 12. 2. Rysunek poglądowy stanowiska kafarowego wraz z modelem stojaka do badań, gdzie: 1 – masa uderowa, 2 – trawersa, 3 – przetwornik drogi, 4 – model badanego stojaka, 5 – sprężyny zabezpieczające trawersę, 6 – zawór hydrauliczny roboczy, 7 – zawór hydrauliczny dodatkowy, 8 – przetwornik ciśnienia, 9 – przetwornik siły, 10 – fundament



Rys. 12. 3. Schemat poglądowy wzorcowego stojaka, gdzie: 1 – tłoczyśko, 2 – cylinder stojaka, 3 – przyłącze do przetwornika ciśnienia, 4 – przyłącze dla zaworu roboczego, 5 – przyłącze dla zaworu dodatkowego, l_h – wysokość słupa cieczy pod tłokiem

Pomniejszoną skalę modelu fizycznego stojaka w odniesieniu do modelu obliczeniowego (rzeczywistego) przyjęto według relacji:

$$S_{mf} = \frac{S_{so}}{S_{sf}} \quad 12.4$$

gdzie:

S_{so} – powierzchnia przekroju modelu stojaka rzeczywistego, m^2 ;

S_{sf} – powierzchnia przekroju modelu stojaka fizycznego (w pomniejszonej skali), m^2 .

Przyjęcie skali modelu według powierzchni przekroju, przeznaczonych do badania, stojaków pozwala uzyskać zbliżone ciśnienia w modelu fizycznym w pomniejszonej skali i stojaka obliczeniowego (rzeczywistego) przy znacznie mniejszych siłach obciążających. Pozwala to na wykorzystanie urządzenia fanfarowego w GIG o masie udarowej 20 Mg w badaniach modelowych w pomniejszonej skali.

Podobne przebiegi przy obciążeniu dynamicznym udarem masy stojaków w skali rzeczywistej i pomniejszonej uzyskamy jeśli będzie spełniony warunek:

$$\omega_o = \omega_f \quad 12.5$$

gdzie:

$\omega_o = \sqrt{\frac{k_{so} \cdot g}{F_r \cdot n_{tz}}}$ – pulsacja modelu rzeczywistego dla wybranych warunków zagrożenia wstrząsami górotworu, s^{-1} ;

$\omega_f = \sqrt{\frac{k_{sf}}{m_u}}$ – pulsacja modelu fizycznego, s^{-1} ;

$k_{sf} = \frac{0,75 \cdot B \cdot S_{sf}}{l_{hf}}$ – sprężystość stojaka fizycznego, Nm^{-1} ;

$k_{so} = \frac{0,75 \cdot B \cdot S_{so}}{l_{ho}}$ – sprężystość stojaka rzeczywistego, Nm^{-1} ;

B – moduł sprężystości objętościowej cieczy, Pa ;

g – przyspieszenie ziemskie, $m \cdot s^{-2}$;

F_r – podporność robocza stojaka w sekcji, N .

Zachowanie równości (12.5) a tym samym podobnych przebiegów ciśnienia obliczonych i zbadanych uzyskamy wysuwając stojak fizyczny w pomniejszonej skali na wysokość określoną zależnością 12.6:

$$l_{sf} = \frac{l_{so} \cdot F_r \cdot n_{tz}}{m_u \cdot g \cdot S_{mf}}, m \quad 12.6$$

Amplitudę przebiegu dynamicznego w modelu fizycznym możemy w przybliżeniu określić z relacji 12.7:

$$E_{uf} = \frac{E_{uo}}{S_{mf}} \quad 12.7$$

gdzie:

$$E_{uf} = m_u \cdot g \cdot h_{gf}, Nm;$$

$$E_{uo} = \frac{(F_r \cdot n_{tz} - F_w)}{g} \cdot g \cdot h_g, Nm;$$

h_{gf} – wysokość spadku masy uderowej, m ;

h_g – wysokość spadku masy obciążającej sekcję, m .

Wyrównanie amplitud przebiegu nastąpi dla ustalonej wysokości masy uderowej modelu h_{gf} bliczonego z relacji:

$$h_{gf} = \frac{h_g (F_r \cdot n_{tz} - F_w)}{S_{mf} \cdot m_u \cdot g}, m \quad 12.8$$

Przedstawione propozycje badań modelowych i ich realizacji stanowią studium koncepcyjne autora i wymagają dalszych prac celem realizacji przyjętych założeń. Pozostaje problem uwzględnienia wpływu na badane przebiegi zaworów hydraulicznych. Jest to oddzielny problem wymagający szczegółowych badań i nie został w niniejszej rozprawie ujęty.

13. PODSUMOWANIE I PROPOZYCJE KOŃCOWE

Zmechanizowane obudowy ścianowe na rynek krajowy wprowadzane są na podstawie Dyrektyw Parlamentu Europejskiego oraz zharmonizowanych z nimi polskimi normami. Polskie normy nie określają wymagań dla sekcji obudów zmechanizowanych przeznaczonych do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, a problem ten dotyczy ponad 60% przypadków eksploatowanych pokładów. W związku z powyższym, uzupełnieniem w wymienionym zakresie uregulowań unijnych jest rozporządzenie właściwego Ministra w sprawie BHP, odpowiedzialnego za górnictwo. Nakłada ono obowiązek oceny upodatkowania sekcji obudowy zmechanizowanej przeznaczonej do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu, w drodze jej przystosowania do przejmowania obciążeń dynamicznych, jako następstwa wstrząsu górotworu. W praktyce, jako jedyny aktualnie na rynku polskim ocenę upodatkowania dokonuje Główny Instytut Górnictwa, według metody własnej. Jest to metoda analityczna oparta o model górotworu naruszonego oraz model płaski sekcji o jednym stopniu swobody i stałych skupionych. Metoda GIG stosowana jest od lat 90. ubiegłego wieku i jest systematycznie udoskonalona wraz z pozyskiwaniem zarówno nowych wyników badań jak i doświadczeń eksploatacyjnych. Upodatkowanie obudowy opracowywane jest na podstawie dokumentacji technicznej sekcji (geometria, parametry techniczne, układy zabezpieczające) oraz dane geologiczno-górnictwo, dostarczane przez Zleceniodawcę.

W przypadkach wymagających uściślenia parametrów technicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, przeprowadzane są badania dodatkowe (laboratoryjne), według potrzeb oraz możliwości technicznych dostępnych na rynku stanowisk badawczych. Bardzo istotnym elementem mającym wpływ na ocenę upodatkowania sekcji obudowy są układy hydrauliczne zabezpieczające sekcje przed przeciążeniem.

Następstwem pogarszających się obecnie warunków geologiczno-górnictwo eksploatacji węgla jest wprowadzanie do użytku elementów kompleksu ścianowego o dużych wydajnościach (kombajn, przenośnik) i podpórnościach (obudowy zmechanizowane). Zwiększanie podpórności sekcji obudowy wymaga stosowania stojaków o coraz większych średnicach cylindrów wewnętrznych. Dotychczas najczęściej stosowane średnice I stopnia stojaka od 0,21 do 0,28 m, zostają wypierane przez stojaki o średnicach I stopnia większych bądź równych 0,30 m (aktualnie w warunkach górnictwa polskiego stosowane są stojaki dwuteleskopowe, z zaworem dennym, o największej średnicy I stopnia 0,42 m). Stosowanie stojaków o tak dużych średnicach wymaga stosowania układów hydraulicznych sterujących

i zabezpieczających o bardzo dużych przepływach masowych, z uwagi na konieczność zachowania dużej prędkości rozpierania i zsuwania (rabowania) sekcji obudowy oraz zabezpieczenia przed przeciążeniami (zawory hydrauliczne ograniczające ciśnienie).

Wraz z wprowadzaniem do eksploatacji stojaków o dużych średnicach obserwuje się występowanie zjawisk dotychczas niespotykanych w nowoczesnych konstrukcjach obudów, a związanych z występowaniem zjawisk dynamicznych, niszczących elementy w układach sterowania i zabezpieczania stojaków. Występujące zjawiska dynamiczne, określone w pracy jako udary hydrauliczne, powodują bardzo duże ilości uszkodzeń elementów hydrauliki, utratę szczelności układów podpornościowych stojaka sekcji, a w skrajnych przypadkach niekontrolowane wyrabowanie obudowy (zaciśnięcie).

W rozprawie opisano cztery przypadki sekcji obudów zmechanizowanych wyposażonych w stojaki o średnicach I stopnia 0,30 m (jeden przypadek); 0,32 m (dwa przypadki) i 0,37 m (jeden przypadek), w których dopełniono wszystkie wymagania i procedury określone normami i przepisami a pomimo to wystąpiło realne zagrożenie bezpieczeństwa w ścianie, wskutek uszkodzeń elementów hydraulicznych i/lub nieszczelności układów zabezpieczających. Zagrożenie bezpieczeństwa eksploatacji wystąpiło przy energiach wstrząsu znacznie poniżej maksymalnie prognozowanych dla danej eksploatacji i w każdym analizowanym przypadku powodowało okresowe zatrzymanie ściany.

Podjęte badania w rozprawie miały na celu w pierwszej kolejności ponowne, bezpieczne uruchomienie ścian (działania doraźne), w drugiej, po przeprowadzeniu badań, usunięcie przyczyn występowania uszkodzeń i odpowiednią modyfikację rozwiązań układów zabezpieczających sekcje obudów zmechanizowanych.

Analizowane sekcje zmechanizowanych obudów będące przedmiotem badań, zostały podzielone na dwie grupy, ze względu na sposób wyprowadzania cieczy z przestrzeni roboczej stojaka. Pierwsza grupa to sekcje wyposażone w stojaki dwuteleskopowe z zaworem dennym w których ciecz z przestrzeni roboczej stojaka wyprowadzana jest zewnętrzną rurką przyłączeniową, zaś druga grupa to stojaki dwuteleskopowe z zaworem dennym w których ciecz z przestrzeni roboczej stojaka wyprowadzana jest wierceniami w płaszczu cylindra.

Realizację rozprawy ujęto w następujące bloki tematyczne (zadania):

- 1) Zadanie pierwsze związane było z działaniami doraźnymi, umożliwiającymi kontynuowanie eksploatacji, przy jednoczesnej minimalizacji występowania uszkodzeń elementów hydrauliki sterującej stojaka, wskutek wstrząsu górotworu. W przypadku obudów ze stojakami o dużych średnicach, w których ciecz z przestrzeni roboczej stojaka wyprowadzana jest zewnętrzną rurką

przyłączeniową, należy bezwzględnie przestrzegać zasady zachowania pracy I stopnia stojaka hydraulicznego, jako stopnia roboczego, z uwzględnieniem odpowiedniej ilości cieczy w przestrzeni podtłokowej (PT) stojaka. Ilość cieczy w przestrzeni podtłokowej stojaka powinna być zgodna z oceną warunków upodatnienia sekcji. Zastosowanie się do podanych zasad w analizowanym przypadku nie wymaga podjęcia dodatkowych czynności jak np. zmiany parametrów roboczych sekcji, nastawy zaworów czy zmian w układzie zabezpieczającym stojaka.

W przypadku obudów zmechanizowanych z wierconymi płaszczami cylindrów, w celu eliminacji występowania uszkodzeń elementów hydrauliki dokonano, doraźnie, zmian w układzie sterowania stojaka oraz zmian parametrów roboczych sekcji (ograniczono ciśnienie robocze), co umożliwiło ponowne uruchomienie ścian. Wprowadzone zmiany nie naruszały warunków dopuszczenia analizowanych sekcji obudów do użytkowania. Zmiana parametrów roboczych sekcji i usprawnienie układu sterowania stojakiem hydraulicznym umożliwiły prowadzenie eksploatacji pokładów z zachowaniem niezbędnego stopnia bezpieczeństwa. Według dokonanych zmian sekcje obudów zmechanizowanych powinny pracować do czasu przeprowadzenia planowanych remontów, które pozwolą na wprowadzenie niezbędnych zmian pozwalających na pełne wykorzystanie podporności sekcji.

- 2) W zadaniu drugim przeprowadzono badania stanowiskowe, specjalnie przygotowanego modelu stojaka hydraulicznego wyposażonego w różne przyłącza, służące do wyprowadzania cieczy z przestrzeni podtłokowej stojaka (wiercenia w płaszczu cylindra oraz rurki zewnętrzne o różnej geometrii). Badania przeprowadzono w stanowiskach pod obciążeniem udarem masy (stanowisko kafarowe w GIG) oraz z wykorzystaniem materiału wybuchowego (stanowisko w ITG KOMAG).
- 3) W zadaniu trzecim opracowana została propozycja modernizacji sekcji: stojaka hydraulicznego (wprowadzeniu zmian w sposobie wyprowadzenia cieczy z przestrzeni podtłokowej do zaworu), w układzie sterowania (odpowiednie podłączenie zaworów hydraulicznych) oraz ustaleniu nowych parametrów roboczych sekcji wraz z ich upodatnieniem. Modernizację układów sterowania proponuje się wykonać podczas remontów sekcji obudów po okresie gwarancyjnym, co wydaje się celowe z uwagi na minimalizację kosztów modernizacyjnych. Proponowana modernizacja pozwoli ujednoczyć sekcje obudów zmechanizowanych posiadających stojaki z wierconymi płaszczami cylindrów w zakresie bezpieczeństwa ich stosowania (wyeliminowanie występowania

uszkodzeń elementów hydrauliki oraz zapewnienie poprawnych warunków utrzymania stropu w ścianie). Zaznacza się jednak, że wprowadzenie zmodernizowanych sekcji, wymagać będzie uzupełnienia badań WE dla każdej odmiany stojaka.

- 4) W zadaniu czwartym przedstawiono koncepcję przeprowadzania badań stojaków o bardzo dużych średnicach w sposób analityczny (na podstawie modelowania numerycznego) i walidację wyników na podstawie badań modeli fizycznych w pomniejszonej skali. Do badań modeli fizycznych w pomniejszonej skali wykorzystać można stanowisko kafarowe znajdujące się w GIG. Docelowo przedstawiona koncepcja badań stojaków o dużych średnicach może stanowić uzupełnienie metody upodatnienia stosowaną w GIG.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, badań i zaproponowanych rozwiązań technicznych można stwierdzić, że została zrealizowana problematyka określona w celu i zakresie rozprawy.

LITERATURA

1. Barczak T. (2012): Think Like a Rock. 30th International Conference on Ground Control in Mining, USA, s. 1-11.
2. Biliński A. (1968): Przejawy ciśnienia górotworu w polach eksploatacji ścianowej w pokładach węgla. Politechnika śląska. Zeszyt Naukowy nr 221. Górnictwo z 31. Gliwice.
3. Biliński A. (1981): Metoda określania stanu zagrożenia tąpnięciami stropowymi na podstawie rozeznania warunków naturalnych i górniczych. Przegląd Górniczy nr 7-8, s. 415-423.
4. Biliński A. (1982): Zasady utrzymania wyrobiska ścianowego o kruchym stropie. Zeszyty Naukowe AGH. Kwartalnik Górnictwa, z. 3, s. 251-267.
5. Biliński A. (1983): Zasady utrzymania wyrobiska w ścianach zagrożonych tąpnięciami stropowymi. Archiwum Górnictwa T. 28, z. 2, s. 275-291.
6. Biliński A. (1985): Tąpnięcia w świetle mechaniki górotworu odprężonego. Zeszyty Naukowe AGH, Kwartalnik Górnictwo z. 2, s. 275-291.
7. Biliński A. (1989): Ocena stanu zagrożenia tąpnięciem wyrobiska eksploatacyjnego. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Seria dodatkowa. Katowice.
8. Biliński A. (2005): Metoda doboru obudowy ścianowych wyrobisk wybierkowych i chodnikowych do warunków pola eksploatacyjnego. Gliwice, Wydaw. CMG KOMAG.
9. Biliński A., Dreinert B., Kostyk T. (1996): Geomechaniczny monitoring zmechanizowanych ścian zlokalizowanych na dużych głębokościach. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa nr 812.
10. Biliński A., Kostyk T., Prusek S. (1997): Zasady doboru obudowy zmechanizowanej dla wyrobisk ścianowych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 3, s. 14-23.
11. Budirsky S. (1978): Dynamische Belastung der mechanisierten Ausbaus bei Gebirgsschlägen im Karbonengestein. Berg und Hüttenmännische Monatshefte, Nr. 4, vol. 123, s.114-125
12. Budirsky, S. (1985): Interaction of powered supports and the strata in coal seams under a heavy roof. Int. J. Min. Eng. No. 3, s. 113–138.
13. Brown F.T. (1962): The Transient Response of Fluid Lines. J. Basic Eng. Trans. ASME, Ser. D., Vol. 84, No.3, p.547-553.
14. Chudek M., Zorychta A. (1996): Obciążenie dynamiczne obudowy wyrobisk górniczych powodowanych wstrząsami górniczymi. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 11, s. 26-35.
15. Czubaszek J., Madejczyk W. (2012): Badania układu sterowania sekcji obudowy zmechanizowanej. Hydraulika i Pneumatyka 2012, nr 2, s. 24-27.
16. Czubaszek J., Szweda S. (2012): Badania zmian ciśnienia w układzie hydraulicznym sekcji obudowy zmechanizowanej. Maszyny Górnicze nr 4, s. 3-8.
17. Dokumentacja konstrukcyjna bloków stojakowych firmy Centrum Hydrauliki DOH, Bytom (2019).
18. Dokumentacja konstrukcyjna zaworów hydraulicznych SP7, SP10, SP12, SP14 firmy „Dagos” s.c., Katowice (2019).
19. Doległo L., Gil J., Stoiński K. (2009): Analityczna ocena wydajności objętościowej układu hydraulicznego stojaka zmechanizowanej obudowy ścianowej. Maszyny Górnicze nr 4, s. 9-18.
20. Domagała Z. (2009): Modelowanie i symulacja zjawisk zachodzących w zmechanizowanej obudowie ścianowej. Maszyny Górniczy nr 4, s. 25-30.

21. Domagała Z., Marianowski J. (2014): Modelowania zjawisk dynamicznych zachodzących w dwustopniowych stojakach hydraulicznych. *Napędy i Sterowanie* nr 7/8, s. 130-137.
22. Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn.
23. Dyrektywa 2014/35/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku sprzętu elektrycznego przewidzianego do stosowania w określonych granicach napięcia.
24. Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2014/30/UEz dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej.
25. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UEz dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej – ATEX.
26. Gil J., Kubiesa R., Stoiński K. (2010): Identyfikacja uszkodzeń hydrauliki sterowniczej zmechanizowanej obudowy ścianowej. Praca zbiorowa Monografia „Cylinder 2009”. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, s. 93-100.
27. Gryboś R. (1989): Podstawy mechaniki płynów, Warszawa, Wydaw. PWN.
28. Gwiazda J. B. (1997): Górnicza obudowa hydrauliczna odporna na tąpnięcia. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
29. Holub K, Rusajova J, Holecko J (2011) Particle velocity generated by rockburst during exploitation of the longwall and its impact on the workings. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, s. 942-949.
30. Hussein M. A., Ibrahim A. R., Imbaby S.S. (2013): Load calculations and selection of the powered supports based on rock mass classification and other formulae for Abu-Tartur longwall phosphate mining conditions. *Mining and Metallurgical Engineering Dept. Faculty of Engineering, Assiut University, Egypt.*
31. Irresberger H., Gräwe F., Migenda P.: Zmechanizowane obudowy ścianowe. Podręcznik dla praktyków. Tiefenbach Polska Sp. z o.o., Katowice 2003.
32. Jaszczuk M. (2004): Problematyka bezpiecznego użytkowania sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
33. Jonuskaite A. (2017): Flow simulation with SolidWorks. Bachelor Thesis, Plastics Technology.
34. Kabiesz J. i inni. (2018): Raport Roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa, wyd. GIG Katowice 2019: 95-99.
35. Kalukiewicz A., Marianowski J. (2011): Nowe rozwiązanie zabezpieczeń funkcjonowania upodatnionej obudowy zmechanizowanej. *Napędy i Sterowanie* nr 7-8, s. 32-36.
36. Kalukiewicz. A., Marianowski J., Kipczak P. (2011): Nowa konstrukcja i wyniki badań zaworu upustowego obudowy zmechanizowanej. *Przegląd Górniczy* nr 11, s. 37-41
37. Kasprusz A. (2007): Optymalizacja konstrukcji hydrauliki sterującej stojaka dla warunków zagrożenia wstrząsami górotworu. Praca doktorska. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
38. Kasprusz A. (2010): Dobór stojaka hydraulicznego zmechanizowanej obudowy ścianowej na przykładzie HYDROMEL 08/22 POz dla warunków zagrożenia

- wstrząsami górotworu. XVIII Międzynarodowa Konferencja „TEMAG” 2010. Gliwice, Politechnika Śląska.
39. Kazimierski Z. (2004): Podstawy mechaniki płynów i metody komputerowej symulacji przepływów. Łódź, Wydaw. Politechniki Łódzkiej.
 40. Kipczak, P. (2011): badania zaworu szybkoupustowego stojaka hydraulicznego z przepływem wewnętrznym dla upodatkowania obudowy hydraulicznej. Praca doktorska, AGH Kraków (niepublikowana).
 41. Klishin V.I. (2002): Adaptacija mekhanizirovannykh krepej k uslovijam dinamičeskogonagruzheija. Nowosybirsk: Wydawnictwo „Science”, ISBN 5-02-031948-1.
 42. Kłeczek Z. (1994): Geomechanika górnicza. Katowice, Wyd. Śląsk.
 43. Madejczyk W. (2012): Badania sekcji obudowy zmechanizowanej oraz hydraulicznych elementów wykonawczych produkcji Fabryki Maszyn i Urządzeń TAGOR SA. Maszyny Górnicze nr 3, s. 20-25.
 44. Madejczyk W. (2013): Metodyka bada układu hydraulicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Maszyny Górnicze nr 1, s. 11-15.
 45. Majcherczyk T., Szaszenko A., Sdwiżkowa E. (2006): Podstawy geomechaniki. Kraków, Uczelniane Wydaw. Naukowo-Dydaktyczne AGH.
 46. Markowicz J., Rajwa S., Szweda S. (2016): Experimental tests of parameters characterizing the cooperation of powered roof support base and floor of low bearing capacity. Archives of Mining Sciences Vol. 61, Issue 4, s. 937–948.
 47. Martin, K, Kizil, M and Canbulat, I. (2012): Analysing the effectiveness of the 1750 tonne shields at Moranbah North Mine. In Proceedings of 12th Coal Operators Conference, University of Wollongong, s. 32-42.
 48. Mazurek K. (2019): Numerical modelling of interaction between mechanical system and fluid. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 261 012032, doi:10.1088/1755-1315/261/1/012032.
 49. Paczeński K., Pytlik A., Radwańska E. (2007): Stanowiskowe badania elementów obudów górnicznych przy ich dynamicznym obciążeniu. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 31, Zeszyt 3/1, s. 451-459.
 50. Peng S. (2006): Longwall Mining. Second Edition. Morgantown, West Virginia University Press.
 51. Peng S. (2007): Ground control failures a pictorial view of case studies. Morgantown, West Virginia University Press.
 52. Płonka M. (2004): Metoda doboru zmechanizowanych obudów ścianowych z wykorzystaniem trójwymiarowego modelu górotworu odprężonego. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa nr 859.
 53. Polska norma PN-EN 1804-1+A1:2011 – Maszyny dla górnictwa podziemnego – Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej – Część 1: Sekcje obudowy i wymagania ogólne.
 54. Polska norma PN-EN 1804-2+A1:2012 – Maszyny dla górnictwa podziemnego – Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej – Część 2: Stojaki i pozostałe siłowniki.
 55. Polska norma PN-EN 1804-3+A1:2012 – Maszyny dla górnictwa podziemnego – Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej – Część 3: Hydrauliczne układy sterowania.
 56. Prusek S. (2016): Stateczność wyrobisk ścianowych podczas eksploatacji pokładów węgla kamiennego z zawalem skał stropowych. Katowice, Wydaw. Głównego instytutu Górnictwa.

57. Prusek S., Rajwa S. (2004): Ocena ryzyka uszkodzenia wyrobiska ścianowego. Wiadomości Górnicze nr 6, s. 287-291.
58. Prusek S., Płonka M., Walentek A. (2016): Applying the ground reaction curve concept to the assessment of shield support performance in longwall faces. Arab. J. Geosci. vol. 9, nr. 3, s. 1-15.
59. Prusek S., Rajwa S., Walentek A., Masny W. (2016a): Powered support selection for longwall workings in dynamic load conditions. 3rd International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Montreal, s. 13-19.
60. Prusek S., Rajwa S., Wrana A., Krzemień A. (2016b): Assessment of roof fall risk in longwall coal mines. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, s. 1-17.
61. Pytlik A. (2008): Drgania w układach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej. Napędy i Sterowanie nr 4, s. 121-130.
62. Pytlik A. (2015): process characteristics of hydraulic legs equipped with safety valves at dynamic load caused by a mining tremor. Arch. Min. Sci., Vol. 60, No 2, s. 595–612.
63. Rajwa S. (2004): Wpływ konstrukcji stojaka hydraulicznego w ścianowej obudowie zmechanizowanej na utrzymanie stropu. Rozprawa doktorska. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
64. Rajwa S., Janoszek T., Świątek J. (2019): The simulation of fluid flow in safety elements of longwall shield support hydraulic legs. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.679 012017, doi:10.1088/1757-899X/679/1/012017
65. Rajwa S., Masny W., Wrana A. (2017): Kompleksowa metoda doboru obudowy zmechanizowanej w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. Wiadomości Górnicze nr 1, s. 2-7.
66. Rajwa S., Prusek S., Stoiński K. (2016): Opis metody upodatnienia zmechanizowanej obudowy ścianowej. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 12, s. 3-8.
67. Raport GIG (2018). Badanie dynamiczne hydraulicznego układu sterowania ze stojakiem Ø300/Ø285/Ø185 x 1545 obudowy, Katowice, nr 587 02588-182, (nie publikowany).
68. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych. Dz.U. 2013 poz. 230.
69. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. Dz. U. Nr 2017 poz. 1118 §523 ust. 1, pkt. 1.
70. Shein G. (2002): Dynamiczne obciążenia zmechanizowanej obudowy ścianowej. Maszyny Górnicze nr 92, s. 39-41.
71. Shi Y., Gu Q., Zhang C., Li J. (1997): Research on the Interaction Between Roof Strata and Shield Supports. Organization: 16th International Conference on Ground Control in Mining, s. 85-91.
72. Singh GSP, Singh UK (2009): Assessment of dynamic loading and rapid yield valve requirement for shield supports in longwall workings. Trans Inst Min Metall Section A Min Technol 118(1), s. 47-52.
73. SolidWorks Help SolidWorks Flow Simulation Overview (2018): https://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/flopress/c_flow_simulation_overview.htm
74. Sprawozdanie (1994): Sprawozdanie w wysjazdu służboweg do Nowosybirsk w dniach 1994.06.25 do 1994.07.02. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).

75. Sprawozdanie (2019a): Sprawozdanie z badania udarem masy stojaka dwuteleskopowego 0,32/0,23 m wraz z zaworami hydraulicznymi ograniczającymi ciśnienie. Sprawozdanie zostało sporządzone w ramach realizacji pracy statutowej GIG nr 11133049-152.
76. Sprawozdanie (2019b): Sprawozdanie z badania udarem masy stojaka dwuteleskopowego 0,32/0,23 m wraz z zaworami hydraulicznymi ograniczającymi ciśnienie. Sprawozdanie zostało sporządzone w ramach realizacji pracy statutowej GIG nr 11133049-152.
77. Spruth F. (1951): Die Druckverteilung vor und im Strebraum. Proceedings of the International Conference about rock pressure and support in the workings. Liege, Institut Nationale de L`industrie Charbonniere (Deutscher text).
78. Stoiński K. (1985): Metoda wyznaczania obciążeń dynamicznych stojaków hydraulicznych oraz obudów ścianowych. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Seria dodatkowa.
79. Stoiński K. (1988): Wybrane problemy współpracy obudowy wyrobisk górniczych z górotworem w warunkach obciążeń dynamicznych – tąpnięć. Zeszyty Naukowe Politechniki śląskiej, seria Górnictwo, Z. 171, Gliwice.
80. Stoiński K. (1990): Metoda badań stojaków hydraulicznych udarem masy. Gliwice, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, zeszyt 175.
81. Stoiński K. (1999): Parametry pracy stojaków hydraulicznych obciążonych dynamicznie. Badania nad dynamiką obciążeń obudowy wyrobisk górniczych. Monografia pod kierunkiem W. Konopko. Wyd. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
82. Stoiński K. (2000): Obudowy górnicze w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. Katowice, Wydaw. Głównego Instytutu Górnictwa.
83. Stoiński K. i inni (2018): Zmechanizowane obudowy ścianowe dla warunków zagrożenia wstrząsami górotworu. Katowice, Wydaw. GIG.
84. Stoiński K., Gil J. (2016): Procedura optymalizacji upodatnienia zmechanizowanej obudowy ścianowej na przykładzie KW-12/25-ZRP. Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie: Wybrane problemy górnictwa podziemnego (Tom I). Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Kotwicy. Łędziny – Kraków, Centrum Badań i Dozoru – Akademia Górniczo-Hutnicza, s. 76–83.
85. Stoiński K., Gil J., Rajwa S. (2014): Kryteria oceny upodatnienia zmechanizowanej obudowy ścianowej. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Szkoleniowa. Wybrane zagadnienia wentylacyjne i pożarowe w kopalniach. Katowice, SITG-GIG.
86. Stoiński K., Doległo L. (2009): Analityczna metoda wyznaczania przepływów z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Praca zbiorowa Monografia „Cylinder 2009”, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, s. 161-170.
87. Stoiński K., Kostyk T. (2005): Sposób określenia upodatnienia sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej – metodą analityczną. Maszyny Górnicze nr 9. 12.
88. Stoiński, K.; Madejczyk, W. (2004): Stojaki Dwuteleskopowe z Wierconymi Płaszciami Cylindrów; Prace Naukowe. Monografie; ITG KOMAG, Gliwice.
89. Stoiński K., Mika M. (2003): Dynamics of Hydraulic Leg of Powered Longwall Support. Journal of Mining Science volume 39, s. 72–77.
90. Stoiński, K., Pytlik, A., Szymała, J. (2007): Uderzenia hydrauliczne powstałe w elementach hydrauliki sterującej zmechanizowanej obudowy ścianowej. Maszyny Górnicze nr. 3, s. 22–27.
91. Szurgacz D. (2011a): Próba określenia dynamicznej mocy stojaka zmechanizowanej obudowy ścianowej przeznaczonego do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami

- górotworu – artykuł dyskusyjny. Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko nr 1, s. 79-87.
92. Szurgacz D. (2011b): Zjawiska dynamiczne w obudowie zmechanizowanej spowodowane wstrząsami górotworu. Wiadomości Górnicze nr 10, s. 561–567.
93. Szurgacz D. (2019): Zmechanizowana obudowa ścianowa w zmiennych warunkach górniczo-geologicznych. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
94. Szurgacz, D.; Brodny, J. (2019): Analysis of the Influence of Dynamic Load on the Work Parameters of a Powered Roof Support's Hydraulic Leg. Sustainability 2019, 11, 2570; doi:10.3390/su11092570
95. Szurgacz D., Brodny J. (2020): Adapting the Powered Roof Support to Diverse Mining and Geological Conditions. Energies 2020, 13, 405; doi:10.3390/en13020405.
96. Szweda S. (2001): Maximal loads acting on legs of powered roof support unit in longwalls with bumping hazard. Journal of Coal Science & Engineering (China) Vol. 7 nr 2, s. 1-15.
97. Szweda S. (2003): Dynamic action of rock mass on the powered support legs. J. Mining Sci. 39 (2), s. 154-161.
98. Szweda S. (2004): Identyfikacja parametrów charakteryzujących obciążenie sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 259.
99. Świątek J., Stoiński K. (2019): Case Analysis of Damages to Control Hydraulics of the Leg in the Powered Roof Support Section. E3S Web of Conferences 105, 03013, doi.org/10.1051/e3sconf/201910503013.
100. Świątek J., Szurgacz D. (2020): The identification of the damage causes of the hydraulic control system components in powered roof support by means of tests and calculations. AIP Conference Proceedings 2209, 020003, doi.org/10.1063/5.0000011.
101. Wang J., Zhang J., Li Y. (2015): Ground control in China's coal mine: progress and prospects. ARMA, American Rock Mechanics Association, <https://www.researchgate.net/publication/301200015>
102. Wójcik M. (1996): Analiza sprężystości stojaków hydraulicznych wyposażonych w zawory upustowe na przejmowanie obciążeń dynamicznych górotworu. Rozprawa doktorska, Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
103. Yetkin M.E., Şimşir F., Özfirat K., Yenice H. (2017): The cost and effect of powered roof support in longwall installation cost. *International Journal of Current Research*, Vol. 9, Issue, 12, s.62355-62357.
104. Znański J. (1964): Górnictwo, tom IV: Podziemna eksploatacja złóż. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk”.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1. Schemat górotworu odprężonego wokół ściany zawalowej;	15
Rys. 2.2. Graficzna prezentacja utrzymania stropu w ścianie	18
Rys. 2.3. Rozkład wartości wskaźnika nośności stropu „g” na wybiegu analizowanej ściany	18
Rys. 2.4. Sposób wyznaczania współczynnika dociążenia n_{tz} i jego zmienność;	20
Rys. 2.5. Schemat wykorzystany w obliczeniach mocy układu górotwór-obudowa	22
Rys. 2.6. Model obliczeniowy płaski o parametrach skupionych sekcji obudowy obciążonej udarem mas z nadległego pokładu (a) i prognozowany przebieg siły obciążającej sekcję (b)	24
Rys. 2.7. Przebieg dynamiczny siły w stojaku dla bardzo dużych wartości tłumienia	25
Rys. 2.8. Przykładowa charakterystyka upodatnienia obudowy;	25
Rys. 2.9. Stanowisko do badań dynamicznych udarem masy w GIG	27
Rys. 2.10. Stanowisko do badań dynamicznych udarem masy w TLO Opava	28
Rys. 2.11. Zarejestrowane przebiegi w badaniu stojaka obciążonego masą o ciężarze zbliżonym do podporności roboczej (stojak jednoteleskopowy o średnicy $\varnothing 0,2$ m, masa udarowa 100 Mg, zawór hydrauliczny $400 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$)	29
Rys. 2.12. Badanie stojaka z wykorzystaniem materiału wybuchowego, bardzo krótki czas obciążenia dynamicznego, w stanowisku ITG KOMAG;	30
Rys. 2.13. Zarejestrowane przebiegi wielkości fizycznych sekcji w warunkach tąpnięcia wg badań Sheina	30
Rys. 2.14. Zarejestrowane przebiegi sił w stojakach sekcji podczas dynamicznych oddziaływań górotworu	31
Rys. 2.15. Przykładowe charakterystyki przepływów masowych w zaworach hydraulicznych	32
Rys. 3.1. Poglądowe przedstawienie realizowanej problematyki	34
Rys. 3.2. Siatka czynności realizowania rozprawy doktorskiej	35
Rys. 4.1. Współczynnik dociążenia n_{tz} w latach 2016-2019 wg GIG	37
Rys. 4.2. Procentowy udział stojaków różnych typów w analizowanej populacji sekcji zmechanizowanych obudów ścianowych w latach 2016-2019	38
Rys. 4.3. Procentowy udział stojaków dwuteleskopowych ze względu na średnicę I stopnia, analizowanego zbioru	38
Rys. 4.4. Procentowy udział stojaków jednoteleskopowych w analizowanym zbiorze ze względu na ich średnicę wewnętrzną	39
Rys. 4.5. Procentowy udział stojaków obudów zmechanizowanych ze względu na wartość współczynnika przeciążenia w badaniu pełnym	40
Rys. 5.1. Schemat poglądowy sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej;	41
Rys. 5.2. Stojak dwuteleskopowy z zaworem dennym – schemat poglądowy;	42
Rys. 5.3. System sterowania stojakiem sekcji obudowy zmechanizowanej;	42
Rys. 5.4. Charakterystyka upodatnienia dla sekcji I, w warunkach ściany 1 według Tablicy 5.1	44
Rys. 5.5. Charakterystyka upodatnienia dla sekcji II w warunkach ściany 2, według Tablicy 5.1	44
Rys. 5.6. Charakterystyka upodatnienia dla sekcji III w warunkach ściany 3, według Tablicy 5.1	45
Rys. 5.7. Charakterystyka upodatnienia dla sekcji IV w warunkach ściany 4 według Tablicy 5.1	45
Rys. 6.1. Przykład zarejestrowanych uszkodzeń elementów układu sterowania w ścianie 4	50
Rys. 7.1. Charakterystyka przepływu układu zabezpieczającego stojak przed przeciążeniem i sposób jego wyznaczenia	53
Rys. 7.2. Analiza przepływów dla oceny całego układu zabezpieczającego analizowany stojak przed przeciążeniem dla 1,5-krotności ciśnienia roboczego P_r	54
Rys. 7.3. Sposób i przebieg wyznaczania udarów hydraulicznych w przyłączy zaworu hydraulicznego zabezpieczającego przestrzeń roboczą stojaka;	55

Rys. 7.4. Badanie udarem masy stojaka wraz z układem sterującym i zabezpieczającym	56
Rys. 7.5. Przykładowe zarejestrowane przebiegi ciśnienia w funkcji czasu	57
Rys. 7.6. Praca stojaka w zakresie przechodzenia z I stopnia na II stopień	58
Rys. 7.7. Przewidywane przeciążenia podczas pracy stojaka hydraulicznego na I stopniu oraz podczas pracy przy przechodzeniu z I na II stopień	60
Rys. 7.8. Wskaźnik nośności stropu „g” podczas pracy stojaka na I i II stopniu.....	61
Rys. 7.9. Zmiany wartości i rozkład nacisków wzdłuż stropnicy i spągnicy dla różnych wysokości pracy sekcji obudowy w zależności od kąta nachylenia stropnicy względem spągnicy.....	62
Rys. 8.1. Badanie dynamiczne stojaka dwuteleskopowego z zaworem dennym o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m z wykorzystaniem materiału wybuchowego	65
Rys. 8.2. Układ hydrauliczny sekcji ze stojakami \varnothing 0,32 oraz \varnothing 0,37 m po dokonanych zmianach;.....	67
Rys. 8.3. Charakterystyka upodatnienia sekcji II (Tablica 5.1) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/32/35$ MPa;.....	68
Rys. 8.4. Charakterystyka upodatnienia sekcji III (Tablica 5.1) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/32/38$ MPa.....	68
Rys. 8.5. Charakterystyka upodatnienia sekcji IV (Tablica 5.1) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/32/45$ MPa.....	69
Rys. 9.1. Przyłącze zaworu stojakowego;	71
Rys. 9.2. Przyłącze zaworu stojakowego;	72
Rys. 9.3. Widok zmienionej geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej.....	74
Rys. 9.4. Charakterystyka zmian wartości ciśnienia na wylocie z przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej w zależności od wartości strumienia objętościowego cieczy	75
Rys. 9.5. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż badanych geometrii rurki przyłączeniowej stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej;.....	76
Rys. 9.6. Widok zmienionej geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej.....	77
Rys. 9.7. Charakterystyka zmian wartości ciśnienia wzdłuż badanych geometrii na wylocie z przyłącza stojaka sekcji w zależności od wartości strumienia objętościowego cieczy.....	78
Rys. 9.8. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż badanych geometrii przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej;.....	79
Rys. 9.9. Charakterystyka zmian wartości ciśnienia na wylocie z przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej w zależności od wartości strumienia objętości oraz zawartości powietrza w cieczy (mieszanina dwufazowa powietrzno-wodna)	80
Rys. 9.10. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż analizowanego przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej wg rys. 9.1 dla wartości strumienia objętości płynu $1000 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$:.....	81
Rys. 9.11. Mapa rozkładu zmian ciśnienia wzdłuż analizowanego przyłącza stojaka sekcji obudowy zmechanizowanej wg rys. 9.1, dla wartości strumienia objętości płynu $2000 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$:.....	82
Rys. 10.1. Rysunek konstrukcyjny badanego stojaka hydraulicznego o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m.....	86
Rys. 10.2. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy udarowej z wysokości 0,2 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15$ MPa dla próby 1 (zawór hydrauliczny SP10 przyłączony do płyty pośredniej);.....	93
Rys. 10.3. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy udarowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15$ MPa dla próby 2 (zawór hydrauliczny SP10 przyłączony do płyty pośredniej) ;.....	93
Rys. 10.4. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy udarowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15$ MPa dla próby 3 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do płyty pośredniej);.....	94

Rys. 10.5. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy udarowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15$ MPa dla próby 5 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do przyłącza długiego o średnicy 0,035/0,025 m);	94
Rys. 10.6. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy udarowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15$ MPa dla próby 11 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do przyłącza długiego o średnicy 0,030/0,02 m);	94
Rys. 10.7. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu dla swobodnego spadku masy udarowej z wysokości 0,4 m przy ciśnieniu wstępnym $P_w=15$ MPa dla próby 17 (zawór hydrauliczny SP12 przyłączony do przyłącza krótkiego o średnicy 0,030/0,02 m);	95
Rys. 10.8. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa, dla próby 1, (czujniki ciśnienia zamontowane w bloku stojakowym oraz w podtłoku stojaka (PT), bez zaworu hydraulicznego)	101
Rys. 10.9. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa;	101
Rys. 10.10. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa;	102
Rys. 10.11. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa, dla próby 7, (Zawór SP12 przyłączony do płyty pośredniej)	102
Rys. 10.12. Zarejestrowane wartości ciśnień w funkcji czasu przy wykorzystaniu generatora obciążenia dynamicznego, przy ciśnieniu wstępnym stojaka 30,0 MPa, dla próby 7, (Zawór SP12 przyłączony do przyłącza długiego i zawór SP10 przyłączony do bloku stojakowego)	102
Rys. 11.1. Przyłącze stojakowe dla podłączenia zaworu dodatkowego	104
Rys. 11.2. Schemat poglądowy zmodernizowanego stojaka;	105
Rys. 11.3. Proponowany ujednoczony układ hydrauliczny przeznaczony dla sekcji z wierconymi stojakami o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 oraz \varnothing 0,37 m;	106
Rys. 11.4. Przykładowa charakterystyka upodatkowania sekcji IV (po modernizacji) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/38/42$ MPa	108
Rys. 12. 1. Model i schemat obliczeniowy górotwór - obudowa,	112
Rys. 12. 2. Rysunek poglądowy stanowiska kafarowego wraz z modelem stojaka do badań,	114
Rys. 12. 3. Schemat poglądowy wzorcowego stojaka,	114

SPIS FOTOGRAFII

Fot. 6.1. Uszkodzone ciśnieniomierze	47
Fot. 6.2. Przykładowy zawór hydrauliczny, tłoczkowy z dociskiem sprężynowym;	47
Fot. 6.3. Przykładowe uszkodzenia zaworów	47
Fot. 6.4. Wyniki badania materiału z którego wykonano złącze Stecko DN12	48
Fot. 6.5. Uszkodzone złącza Stecko DN12	49
Fot. 6.6. Wyniki badania materiału z którego wykonano tłoczek zaworu	49
Fot. 10.1. Pozyskany do badań stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,32 m, z zaznaczonym oryginalnym wyprowadzeniem dla wierceń w płaszczu cylindra	84
Fot. 10.2. Pozyskany do badań stojak o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m z zaznaczonym oryginalnym wyprowadzeniem dla wierceń w płaszczu cylindra	85
Fot. 10.3. Widoczna rysa na cylindrze honowanego stojaka o średnicy I stopnia \varnothing 0,37 m	86
Fot. 10.4. Przygotowany do badań model stojaka wraz z dodatkowymi przyłączami	87
Fot. 10.5. Stanowisko kafarowe w GIG;	88

Fot. 10.6. Wariant pierwszy podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	89
Fot. 10.7. Wariant drugi podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	90
Fot. 10.8. Wariant trzeci podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	90
Fot. 10.9. Wariant czwarty podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	91
Fot. 10.10. Stanowisko badawcze w ITG KOMAG	96
Fot. 10.11. Wariant pierwszy podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	97
Fot. 10.12. Wariant drugi podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	98
Fot. 10.13. Wariant trzeci podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	98
Fot. 10.14. Wariant czwarty podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	99
Fot. 10.15. Wariant piąty podłączenia elementów hydraulicznych w układzie zabezpieczającym stojak.....	99
Rys. 11.1. Przyłącze stojakowe dla podłączenia zaworu dodatkowego.....	104
Rys. 11.2. Schemat poglądowy zmodernizowanego stojaka;.....	105
Rys. 11.3. Proponowany ujednolicony układ hydrauliczny przeznaczony dla sekcji z wierconymi stojakami o średnicy I stopnia $\varnothing 0,32$ oraz $\varnothing 0,37$ m;.....	106
Rys. 11.4. Przykładowa charakterystyka upodatnienia sekcji IV (po modernizacji) przy parametrach roboczych $P_w/P_r/P_N = 25/38/42$ MPa	108

SPIS TABLIC

Tablica 5.1. Podstawowe dane techniczne analizowanych sekcji oraz warunki górnicze ich prowadzenia	43
Tablica 7.1. Zależności kąta nachylenia stropnicy w odniesieniu do długości oraz kąta nachylenia stojaka	62
Tablica 10.1. Zbiorcze wyniki przeprowadzonych badań modelu stojaka pod obciążeniem dynamicznym z wykorzystaniem udaru masy	92
Tablica 10.2. Zbiorcze wyniki przeprowadzonych badań modelu stojaka pod obciążeniem dynamicznym z wykorzystaniem metody wybuchowej.....	100
Tablica 12. 1. Zestawienie prędkości narastania ciśnień w stojaku oraz wartości połowy okresu drgań	111