

JACEK FELIKS

## Innowacyjne rozwiązanie mieszalnika mułów węglowych

*W trakcie wzbogacania węgla w zakładach przeróbki mechanicznej powstają drobnoziarniste muły węglowe o dużej wilgotności. Odpady te mogą być wykorzystane w mieszankach energetycznych po obróbce mającej na celu obniżenie wilgoci. Dlatego też między innymi wykonuje się grudkowniki mułów węglowych.*

*W Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych powstał projekt prototypowej instalacji do grudkowania mułów węglowych o wydajności 50 Mg/h. Zasadniczą częścią instalacji jest mieszalnik. W dolnej części mieszalnika znajduje się otwór, który zamykany jest talerzem. W czasie pracy grudkownika talerz jest uchylony i wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi. Rotacja bębna i mieszadeł zainstalowanych wewnątrz mieszalnika powodują rozdrabnianie mułu oraz jego homogenizację. Istotny dla prawidłowej eksploatacji mieszalnika jest prawidłowo działający układ zamykania bębna. Zaprojektowano układ, który pozwolił na opuszczanie talerza w pierwszym etapie wewnątrz otworu bębna ruchem prostoliniowym, a po wyprowadzeniu z otworu wysypu odchylenie o założony kąt. Projekt wymagał zbadania kinematyki układu i określenia obciążeń układu napędowego, co pozwoliło na wyznaczenie parametrów eksploatacyjnych. W pracy przedstawiono tok postępowania, wyniki badań podstawowych wraz z ich analizą. Wykonano dobór optymalnych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na podstawie metody syntezy graficznej, stworzony model symulacyjny oraz badania prototypowego urządzenia.*

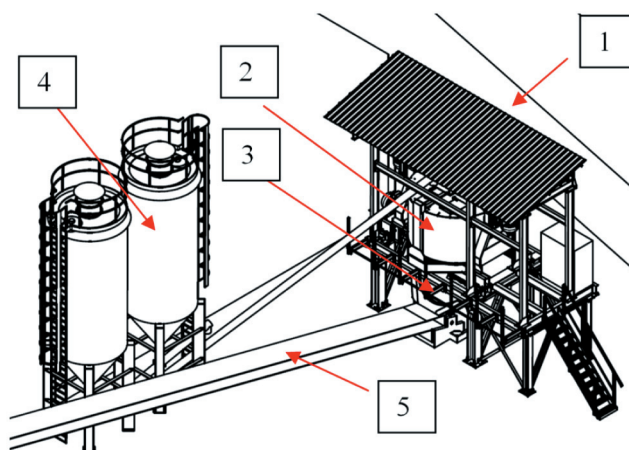
Słowa kluczowe: *grudkowanie, aglomeracja, mieszalnik, paliwa alternatywne, muły węglowe, palety, granulacja, układy zamykania zbiorników*

### 1. WSTĘP

W trakcie procesów wzbogacania węgla w zakładach przeróbki mechanicznej kopalń węgla kamiennego powstają drobnoziarniste odpady przemysłowe o dużej wilgotności, zwane mułami węglowymi. Są to najdrobniejsze klasy ziarnowe o uziarnieniu poniżej 1 mm, w których frakcje poniżej 0,035 mm stanowią nawet 60% udziału masowego. W zależności od parametrów jakościowych (zawartość popiołu i siarki, wartość opałowa itp.) muły te mogą być kierowane bezpośrednio do mieszanek energetycznych lub są deponowane w osadnikach ziemnych poszczególnych kopalń. Duża wilgotność powierzchniowa mułu, wynosząca po odwodnieniu na filtrach od 25% do 30%

powoduje trudności przy wyładunku tego produktu z wagonów, zwłaszcza w okresie zimowym z uwagi na brak skutecznych tanich środków przeciwdziałających zamarzaniu. Najkorzystniejszym sposobem obniżenia zawartości wilgoci w mule węglowym jest oddziaływanie chemiczne, w wyniku którego zostaje obniżona wilgotność przemijająca mułu węglowego. Tak przygotowane mieszanki energetyczne można poddać procesowi aglomeracji ciśnieniowej [1] lub korzystniejszej ze względu na niższą energochłonność aglomeracji bezciśnieniowej (grudkowania) [2–9].

W Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH powstał projekt prototypowej instalacji do grudkowania mułów węglowych (rys. 1) o wydajności 50 Mg/h.



Rys. 1. Stacja do grudkowania mułów węglowych: 1 – układ podawania mułu węglowego, 2 – mieszalnik, 3 – grudkownik talerzowy, 4 – układ podawania dodatków wiążących, 5 – taśmociąg odprowadzający produkt

W skład instalacji do grudkowania mułu węglowego wchodzi następujące podzespoły:

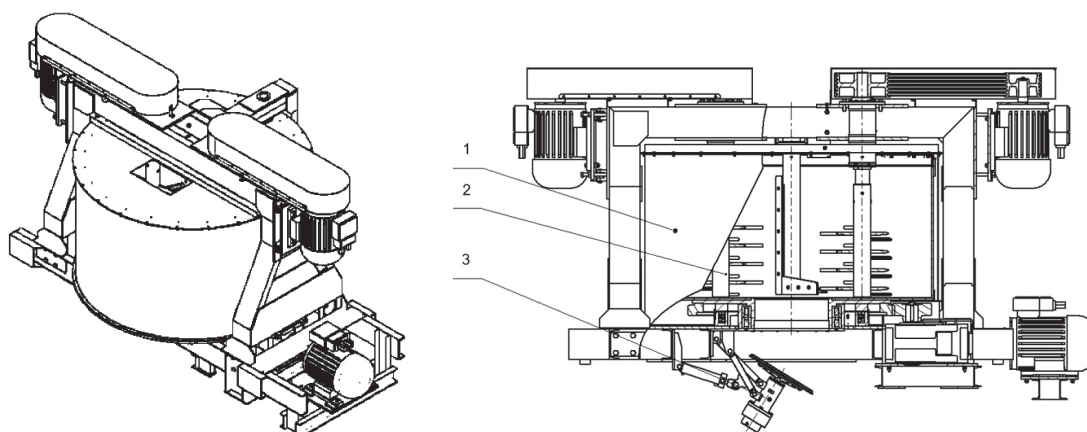
- układ podawania mułów węglowych (1),
- mieszalnik (2),
- grudkownik talerzowy (3),
- układ podawania dodatków wiążących (4),
- układ odbioru produktu (5).

Zasadniczą częścią instalacji jest mieszalnik (rys. 2) zbudowany z bębna obrotowego o średnicy 2,7 m i wysokości 1,6 m, do którego podawany jest muł węglowy i dodatki wiążące (wapno palone). W bębnie zabudowane są dwa mieszadła posiadające niezależne napędy, mające za zadanie rozdrabnianie podawanego w kawałkach mułu oraz wymieszanie go z podawaną przenośnikiem ślimakowym z silosu substancją umożliwiającą obniżenie wilgotności mułu. W dolnej części bębna mieszalnika znajduje się otwór, którym wydostaje się materiał. Otwór ten zamykany jest talem. W czasie pracy grudkownika talerz jest uchylony i wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi.

Układ ten pomaga w rozładowaniu bębna oraz częściowo powoduje grudkowanie materiału.

Materiał po ustaleniu się procesu homogenizacji poprzez otwór w dnie bębna podawany jest na grudkownik talerzowy, na którym dochodzi do grudkowania materiału. Zgrudkowany materiał opuszczający grudkownik talerzowy podawany jest na przenośnik taśmowy, którym transportowany jest na plac składowy. Konstrukcja stacji umożliwia dodawanie innych komponentów do wytwarzanych mieszanek paliwowych na bazie mułu czy miazgi węglowej.

Istotny dla poprawnej eksploatacji układu mieszania jest prawidłowo działający układ zamykania zbiornika. W założeniu układ ten powinien zamykać szczelnie zbiornik, a po otwarciu talerz układu zamykającego powinien wychylić się o określony kąt wynoszący do 30°. Układ łożyskowania bębna ogranicza wielkość otworu wylotowego do 730 mm. Średnica ta ogranicza wielkość talerza zamykającego. W celu poprawnej eksploatacji układu talerz zamykający powinien zmniejszać przestrzeń wysypu materiału (zmniejszenie ryzyka powstawania nawisów mułu).



Rys. 2. Mieszalnik mułów węglowych: 1 – bęben, 2 – układ mieszadeł, 3 – układ zamykania bębna

Wysokość tej przestrzeni przy założonej średnicy nie powinna przekraczać 200 mm. W przypadku mieszalnika konstrukcji AGH powoduje to konieczność wprowadzania talerza zamykającego na głębokość co najmniej 125 mm. Powyższe wymogi spowodowały konieczność zaprojektowania układu, który pozwoliłby na opuszczanie talerza w pierwszym etapie wewnątrz bębna ruchem prostoliniowym, a po wyprowadzeniu z otworu wysypu odchylenie o założony kąt.

## 2. WYZNACZENIE PARAMETRÓW UKŁADU KINEMATYCZNEGO RAMION

Znając założenia konstrukcyjne (średnicę talerza 730 mm, przesunięcie względem podstawy bębna min. 125 mm, maksymalny kąt wychylenia talerza  $30^\circ$ ), zaproponowano układ czworoboku przegubowego, w którym ramiona ( $R$ ,  $r$ ) są różnych długości i w pozycji podniesionej do siebie równoległe [10]. Pierwszym etapem było dobranie odpowiedniej długości ramion tak, aby nie następowała kolizja pomiędzy talerzem a otworem w bębnie miksera. W konstrukcji miksera przewidziano luz pomiędzy talerzem a otworem

bębna wynoszący 15 mm pozwalający na swobodne wysunięcie talerza zamykającego.

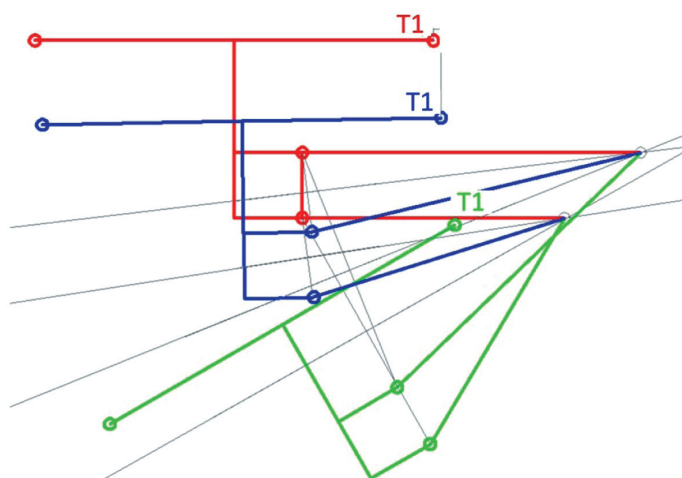
### 2.1. Geometryczne wyznaczenie długości ramion

Wstępnie dobrano długości, wykorzystując metodę syntezy graficznej czworoboku przegubowego realizującego przejście przez trzy zadane położenia (rys. 3).

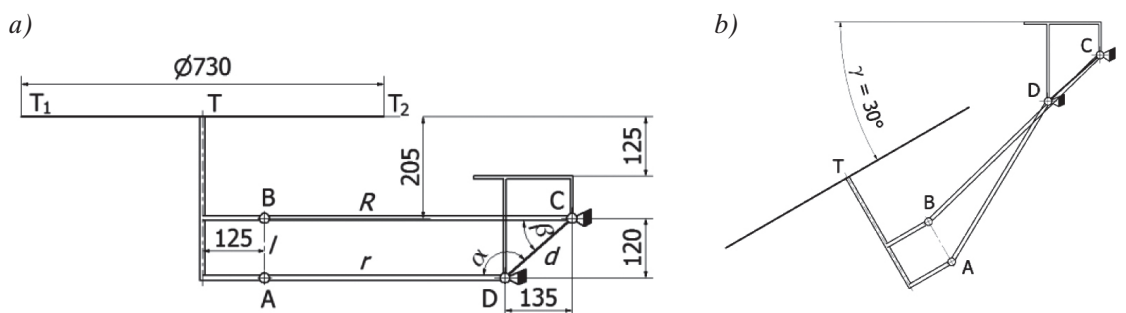
Na rysunku 3 pokazano układ ramion analizowanego mechanizmu zgodnie ze wstępnie przyjętymi założeniami. Przesunięcie talerza względem otworu (punkt T1) nie przekracza założonych 15 mm. Z analizy wynika, że ramię górne powinno mieć większą długość od ramienia dolnego. Dobrano długość ramienia górnego wynoszącą 620 mm, a ramienia dolnego – 480 mm.

### 2.2. Weryfikacja poprawności działania układu

Zaproponowany czworobok przegubowy (rys. 3) pozwolił na stworzenie płaskiego modelu układu zamykania pozwalającego przeanalizować kinematykę (rys. 4) [11].



Rys. 3. Analiza czworoboku przegubowego realizującego przejście przez trzy położenia: czerwone – bęben zamknięty, niebieskie – talerz w pozycji dolnej płaszczyzny bębna, zielone – maksymalne otwarcie i wychylenie talerza



Rys. 4. Model płaski układu zamykania: a) talerz w pozycji podniesionej; b) talerz w pozycji opuszczonej

Założono, że układ napędzany jest siłownikiem hydraulicznym dwustronnego działania wywołującego obrót ramienia AD. Punktem wyjścia do rozwiązania kinematyki jest równanie wektorowe:

$$\overline{DA} + \overline{AB} + \overline{BC} = \overline{CD} \quad (1)$$

gdzie długości wektorów:

$$R = \overline{BC}, \quad r = \overline{AD}, \quad l = \overline{AB}, \quad d = \overline{CD},$$

czyli:

$$\overline{DA} = \begin{bmatrix} r \cos \alpha \\ r \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad \overline{BC} = \begin{bmatrix} R \cos \beta \\ -R \sin \beta \end{bmatrix}, \quad \overline{CD} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix},$$

można zatem zapisać:

$$\overline{AB}^T \cdot \overline{AB} = l^2 \quad (2)$$

po rozwinięciu:

$$(R \sin \beta - r \sin \alpha)^2 + (d - R \cos \beta - r \cos \alpha)^2 = l^2 \quad (3)$$

układ będzie wychylany za pomocą ramienia  $r$ , stąd też zakładamy dany kąt  $\alpha$ .

W dalszych rozważaniach podstawiamy:

$$p = \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta \quad (4)$$

równanie (3) po zastosowaniu podstawienia (4) i zależności algebraicznych dla połowy kąta przyjmuje postać:

$$\left( R \frac{2p}{p^2+1} - r \sin \alpha \right)^2 + \left( d - R \frac{(1-p^2)}{p^2+1} - r \cos \alpha \right)^2 = l^2 \quad (5)$$

Równanie to ma dwa rozwiązania, z których wybieramy jedno odpowiadające geometrii (rys. 4):

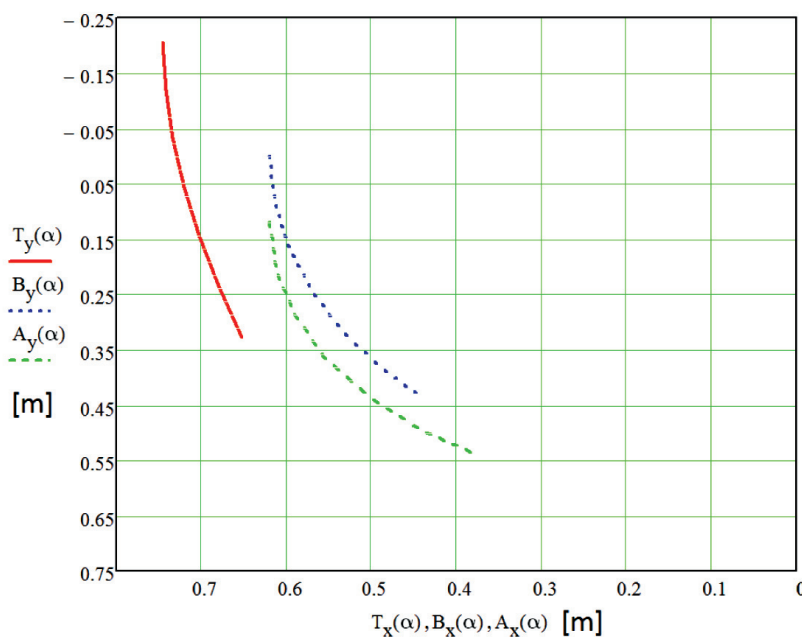
$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{K} + 2Rr \sin \alpha}{R^2 + 2Rd - 2Rr \cos \alpha + d^2 - 2dr \cos \alpha - l^2 + r^2} \quad (6)$$

gdzie:

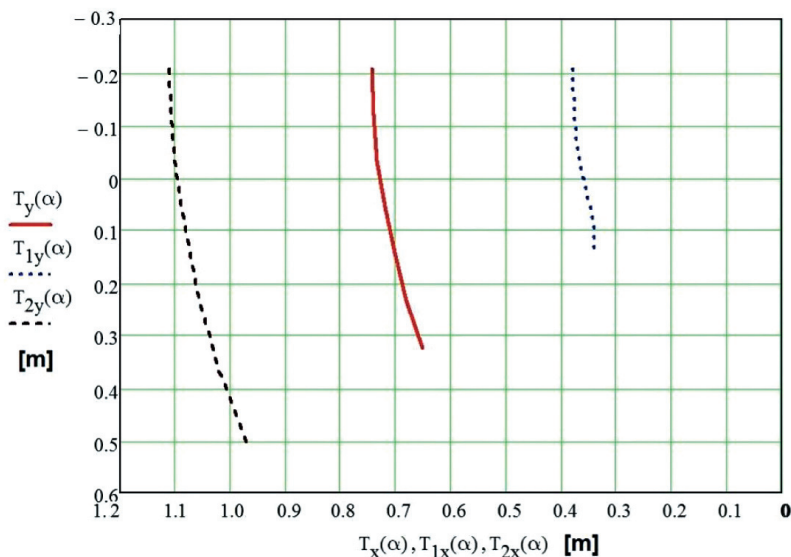
$$\begin{aligned} K = & -R^4 - d^4 - l^4 - r^4 + 2R^2d^2 + \\ & + 2R^2l^2 + 2R^2r^2 + 2d^2l^2 - 4d^2r^2 + \\ & + 2l^2r^2 - 2d^2r^2 \cos 2\alpha + \\ & + 4dr(-R^2 + d^2 - l^2 + r^2) \cos \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

Znając wartość kąta  $\beta$ , możemy określić położenie punktów A i B oraz wartość kąta  $\gamma$ , co pozwala wyznaczyć trajektorię punktu T. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy wykres położenia punktów A, B oraz T przy założonym środku układu współrzędnych w punkcie C i osiach x poziomo i y pionowo.

Aby nie następowała kolizja talerza z bębniem mieszalnika, istotne jest, aby punkt T2 (rys. 4) przy przesunięciu  $y$  o 125 mm nie powodował większego niż przewidziany luz przemieszczenia wzdłuż osi  $x$ . W celu weryfikacji założeń sporządzono wykres położenia trzech charakterystycznych punktów talerza (T, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) (rys. 6).

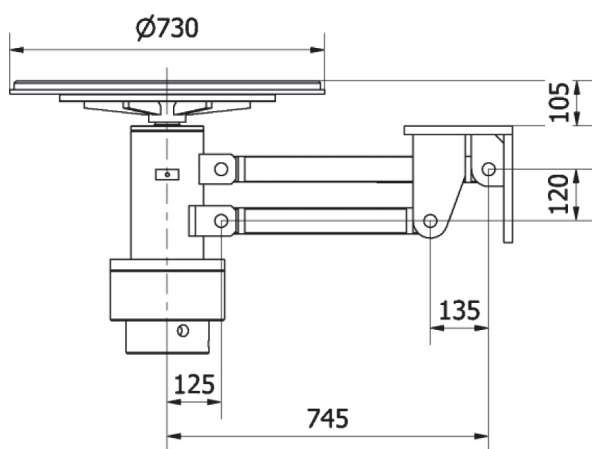


Rys. 5. Przykładowe trajektorie punktów A, B i T w zależności od kąta wychylenia ramienia AD ( $\alpha$ )



Rys. 6. Trajektorie trzech charakterystycznych punktów talerza

Analiza położenia wykazała, że taki układ kinematyczny spełnia wymogi wobec konstrukcji. Określono również kąt  $\alpha$ , o jaki należy obrócić ramię dolne, aby uzyskać wychylenie talerza o  $30^\circ$ . Kąt ten wyniósł  $58^\circ$ . Następnym etapem prac było stworzenie modelu układu zamykania (rys. 7) uzupełnionego o układ napędu talerza.



Rys. 7. Model układu zamykania bębna z układem napędu talerza

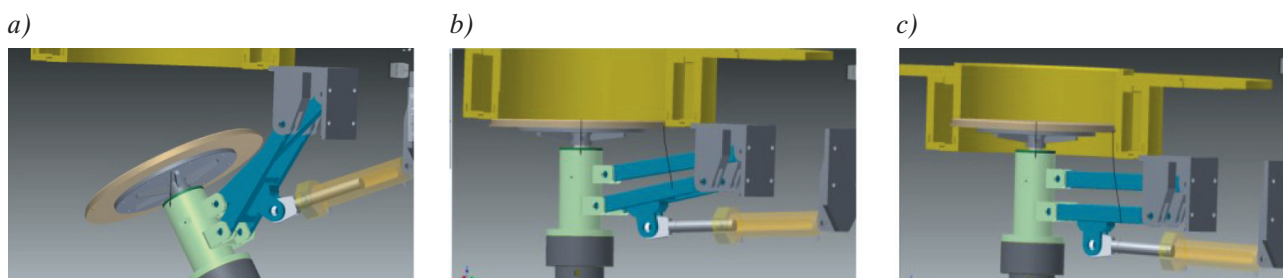
Do napędu talerza dobrano silnik hydrauliczny o następujących parametrach:

- chłonność jednostkowa silnika:  $1000 \text{ cm}^3/\text{obr}$ ,
- ciśnienie nominalne: 16 MPa,
- ciśnienie maksymalne: 25 MPa,
- moment obrotowy nominalny: 2500 Nm,
- maksymalna prędkość obrotowa: 160 obr/min,
- praca przy założonej prędkości obrotowej w zakresie: 30–50 obr/min.

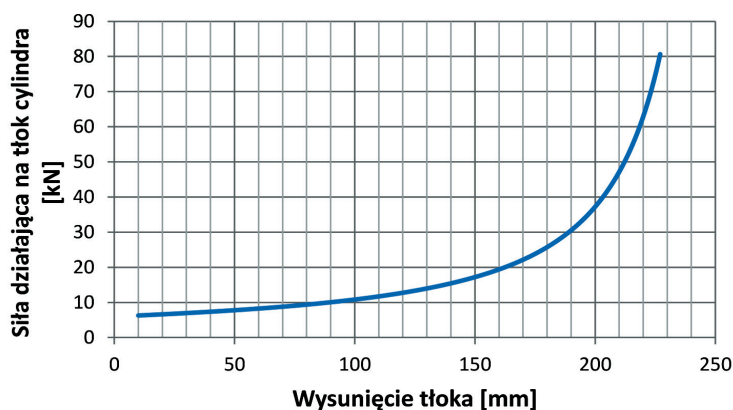
### 2.3. Weryfikacja modelu dla założonych parametrów konstrukcyjnych

Do prawidłowej eksploatacji układu istotne jest odpowiednie zaprojektowanie układu podnoszenia ramienia dolnego. Założono, że do napędu ramienia dolnego zostanie wykorzystany siłownik hydrauliczny. Stworzony model układu zamykania uzupełniono o siłownik hydrauliczny, który zamontowano na dodatkowym uchwycie (rys. 8).

W przypadku takiego układu skok tłoka siłownika hydraulicznego, określony na podstawie analizy kinematyki, powinien wynosić co najmniej 220 mm. Na tej podstawie dobrano siłownik hydrauliczny o skoku 230 mm.



Rys. 8. Model układu zamykania w trzech pozycjach: a) otwartej; b) na styku z dolną powierzchnią bębna; c) zamkniętej



Rys. 9. Ilustracja przebiegu wartości siły działającej na tłok cylindra

W celu określenia pozostałych parametrów siłownika hydraulicznego poddano ten układ analizie dynamicznej. Na jej podstawie wyznaczono siły działające na tłok siłownika przy założeniu maksymalnego obciążenia talerza materiałem o masie 150 kg. W trakcie analizy założono stałą prędkość wysuwu tłoka. Na podstawie symulacji sporządzono wykres siły działającej na tłok w zależności od stopnia jego wysunięcia (rys. 9).

Maksymalna wartość siły działającej na tłok wystąpi w chwili zamknięcia bębna i wyniesie ona 80 kN. Dla zaprojektowanej konstrukcji układu podnoszenia kłapy dobrano siłownik hydrauliczny kłapy zamykającej o następujących parametrach:

- element napędowy: siłownik hydrauliczny  $\varnothing 80/45$  dwustronnego działania z jednostronnym tłoczyskiem, zakończony przegubami kulistymi mocującymi,
- pole powierzchni kołowej czynnej tłoka:  $50,30 \text{ cm}^2$ ,
- pole powierzchni pierścieniowej czynnej tłoka:  $34,4 \text{ cm}^2$ ,
- skok tłoka – 230 mm,
- stała prędkość wysuwania tłoczyska: ok. 4,9 cm/s,
- nastawiana prędkość wsuwania tłoczyska: maks. ok. 7,1 cm/s,
- maksymalna siła pchania: ok. 80 kN (dla  $p = 16 \text{ MPa}$ ),
- wymagana siła pchania podczas wysuwu tłoczyska: 70 kN (dla  $p = 13,9 \text{ MPa}$ ),
- maksymalna siła ciągnięcia: ok. 55 kN (dla  $p = 16 \text{ MPa}$ ),
- wymagana siła opuszczania kłapy podczas wsuwu tłoczyska: 25 kN ( $p \approx 5,0 \text{ MPa}$ ).

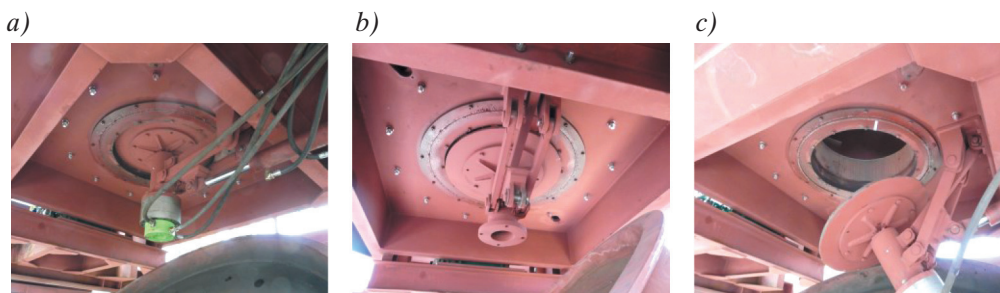
### 3. BADANIA EKSPLOATACYJNE UKŁADU ZAMYKANIA

Na podstawie sporządzonej dokumentacji wykonano prototypowe urządzenie do grudkowania mułów węglowych z zaproponowanym układem zamykania zbiornika. Pierwszym etapem badań eksploatacyjnych urządzenia było sprawdzenie poprawności przemieszczania talerza. Na rysunku 10 pokazano zdjęcia z badań.

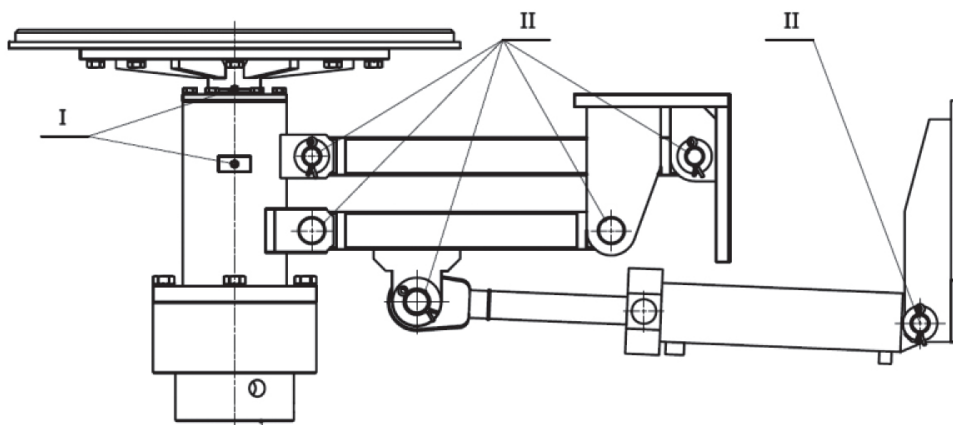
W trakcie otwierania i zamykania bębna nie następowała kolizja pomiędzy talerzem kłapy zamykającej a bębniem (rys. 10b). Badania pokazały prawidłowo dobraną długość ramion i miejsca ich zamocowania. Siłownik pracował poprawnie i nie następowało przekroczenie jego parametrów technicznych.

### 4. UWAGI EKSPLOATACYJNE

Prawidłowa praca zespołu obrotowego talerza uwarunkowana jest zapewnieniem odpowiedniego smarowania. Podczas montażu wszystkie sworznie oraz współpracujące powierzchnie przegubów należy pokryć smarem grafitowym. Na rysunku 11 zaznaczono punkty smarowania zespołu. W tabeli 1 podano miejsce oraz sposób smarowania, rodzaj smaru i czasookres smarowania.



Rys. 10. Układ zamykania mieszalnika: a) w pozycji zamkniętej; b) w pozycji pośredniej; c) w pozycji otwartej



Rys. 11. Rozmieszczenie punktów smarowania w zespole obrotowym talerza

Tabela 1

Miejsca oraz sposób smarowania zespołu obrotowego talerza

Nr miejsca smarowania	Części smarowane	Sposób smarowania	Minimalny czasookres
I	łożyska wału	smarownica	raz na 3 miesiące
II	sworznie	kroplowo	raz na 3 miesiące

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone podstawowe badania modelowe oraz ich analiza, a także zaprojektowany i wykonany układ zamykania zbiornika podczas badań eksploatacyjnych mieszalnika w pełni sprostają powierzonymu zadaniu. Zaproponowany układ pozwala na precyzyjną regulację szczeliny wylotowej, dzięki czemu uzyskujemy wysyp materiału o określonej granulacji. Układ ten umożliwia precyzyjne ustalenie wydajności grudkownika. Zastosowanie sworzniowych połączeń przegubów (brak elementów elastycznych) pozwoliło na uzyskanie wyższej trwałości konstrukcji. W urządzeniu do podnoszenia i odchylania talerza wykorzystano pojedynczy siłownik, co w znacznym stopniu upraszcza sterowanie i regulację parametrów technologicznych mieszalnika. W trakcie eksploatacji urządzenia w roku 2013 wytworzono 70 tys. Mg produktu. Produkt ten spełniał oczekiwania odbiorców, a urządzenie nie stwarzało poważnych problemów eksploatacyjnych.

### Literatura

- [1] Dzik T., Hryniewicz M.: *Research on pressure agglomeration of composite fuels*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2013, 52, 3: 165–167.
- [2] Feliks J.: *Badania laboratoryjne granulowania mułów węglowych*, „Chemik: Nauka – Technika – Rynek” 2012, 66, 5: 388–395.

- [3] Feliks J.: *Performance tests of waste coal sludge granulation*, „Polish Journal of Environmental Studies”, 2012, 21, 5A: 69–72.
- [4] Feliks J.: *Granulation of dolomite and limestone in the vibratory granulator*, „Przemysł Chemiczny” 2015, 94, 5: 771–773.
- [5] Feliks J., Mitura A., Marciniak-Kowalska J.: *Analysis of possibilities of application of vibratory cluster producing device to alternative fuel production*, „Polish Journal of Environmental Studies” 2013, 22, 6A: 12–17.
- [6] Kuczyńska I.: *Grudkowanie – forma przygotowania odpadów do wykorzystania lub unieszkodliwienia*, „Chemik: Nauka – Technika – Rynek” 2008, 61, 9: 434–435.
- [7] Obraniak A.: *Granulacja popiołów lotnych uzyskanych ze spalania węgla brunatnego*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2013, 52, 3: 213–215.
- [8] Robak J., Matuszek K.: *Granulowanie paliwa z odpadów*, „Chemik: Nauka – Technika – Rynek” 2012, 61, 9: 418–424.
- [9] Sidor J., Feliks J.: *Vibratory granulators*, „Przemysł Chemiczny” 2015, 94, 5: 767–770.
- [10] Feliks J.: *Mechanizm zamykania dolnej pokrywy zbiornika obrotowego, zwłaszcza materiałów sypkich*, Patent nr PL 224714 B1, 2013.
- [11] Grabysz W.: *Wybrane zagadnienia symboliczno-numerycznej symulacji mechanizmów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Katowice 2002.

dr inż. JACEK FELIKS  
 Katedra Maszyn Górniczych,  
 Przerobczych i Transportowych  
 Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
 AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
 im. Stanisława Staszica w Krakowie  
 al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
 feliks@agh.edu.pl