

## WŁAŚCIWOŚCI PŁYNIĘCIA WYBRANYCH SPOŻYWCZYCH MATERIAŁÓW SYPKICH

Ewa Domian, Łukasz Milczarski

**Streszczenie.** W pracy badano właściwości płynięcia wybranych sypkich materiałów spożywczych w teście jednoosiowego ścinania według procedury pomiarowej zgodnej z teorią Jenike, przy czterech poziomach naprężenia konsolidującego z zakresu  $6\pm 16$  kPa. Pomiarów wykonano dla dwóch rodzajów preparatów białka sojowego oraz dla dwóch rodzajów serwatki w proszku. Dla każdego rodzaju materiału wyznaczono parametry plastycznego płynięcia takie, jak kohezja, kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, funkcja płynięcia. Test jednoosiowego ścinania wykazał diametralnie różne właściwości mechaniczne preparatów sojowych i serwatki w proszku. Preparaty sojowe w proszku określono jako słabo kohezyjne, łatwo płynące. Preparaty serwatkowe są proszkami kohezyjnymi, trudno płynącymi.

**Słowa kluczowe:** funkcja płynięcia, test ścinania, białko sojowe, serwatka w proszku

### WSTĘP

W technologii materiałów sypkich w większości operacji jednostkowych takich, jak przesiewanie, mieszanie, mielenie, dozowanie, pakowanie, pneumatyczny transport, suszenie, aglomeracja, określenie ruchu ośrodka sypkiego ma podstawowe znaczenie. Właściwości mechaniczne materiału sypkiego odgrywają ważną rolę w wyjaśnieniu i rozwiązywaniu problemów związanych z jego magazynowaniem, transportem i obrotem. Konsolidacja, zawieszanie i przesklepanie się materiału sypkiego w zbiorniku oraz przepływ tunelowy są przykładami problemów występujących podczas magazynowania i transportu [Knowlton i in. 1994, Schwedes 2002].

Właściwości mechaniczne złoża materiału sypkiego, szczególnie zdolność do płynięcia, sypkość i ściśliwość, zdeterminowane są właściwościami ogólnymi cząstek (skład chemiczny, wielkość i kształt cząstek), właściwościami powierzchniowymi (chropowatość, obecność substancji obcych, warstw ciekłych), adhezją i kohezją oraz strukturą złoża (otwarta, zamknięta, jednorodna). Istotność każdego z wymienionych czynników i ich oddziaływanie jest uzależnione zarówno od procesu i warunków w jakich cząstki były tworzone, jak również od warunków składowania materiału sypkie-

---

go, szczególnie z uwzględnieniem ciśnienia statycznego złoża i czasu oraz wilgotności i temperatury [Peleg 1985, Schubert 1987 a].

Najistotniejszą z właściwości mechanicznych materiałów sypkich jest ich zdolność do płynięcia. Ogólnie płynięcie materiałów sypkich można określić jako ruch cząstek czy ziaren względem sąsiednich lub wzdłuż stykającej się z nimi powierzchni [Peleg 1985].

Mechanizm płynięcia materiału sypkiego jest całkiem odmienny od płynięcia cieczy. Charakterystyczne dla materiałów sypkich jest to, że mogą w stanie spoczynku przenosić naprężenia ścinające. Statyczny kąt tarcia wewnętrznego materiałów sypkich jest większy od zera, co powoduje formowanie usypisk, czego nie obserwuje się dla cieczy. Naprężenia ścinające w „płynącym” materiale sypkim mogą być traktowane jako niezależne od szybkości ścinania, zależą natomiast od ciśnienia występującego wewnątrz materiału. W cieczach jest odwrotnie, naprężenia ścinające są zależne od szybkości ścinania, nie zależą natomiast od wartości ciśnienia w cieczy. Ponadto, wiele materiałów sypkich, zwłaszcza proszków i pyłów, zasadniczo zmienia swoją podatność na płynięcie w wyniku wywarcia na nie nacisku. Następuje wtedy tzw. skonsolidowanie materiału, w wyniku którego materiał zyskuje znaczną wytrzymałość na deformację. Przy tej samej konsolidacji różne materiały wykazują inną wytrzymałość. Wpływa to na charakter ich przepływu – bardziej wytrzymały materiał trudniej wypływa, niż materiał o mniejszej wytrzymałości. Konsolidacja materiałów podczas składowania może doprowadzić do zakłóceń wypływu ze zbiornika, a w skrajnym wypadku do całkowitego zatrzymania przepływu. Występowaniu wyżej wymienionych zjawisk zapobiega takie zaprojektowanie zbiornika, aby zagwarantowany był przepływ materiału zapewniający łatwe i równomierne opróżnianie. Geometria zbiornika (wielkość, nachylenie ścian, średnica otworu wylotowego) zapewniająca przepływ hydrauliczny musi uwzględniać właściwości mechaniczne materiału sypkiego [Kobiela 1990, Schwedes 2002].

Metodą najbardziej przydatną do określenia właściwości płynięcia materiałów sypkich są badania bezpośredniego ścinania. Wielkości uzyskane z testów ścinania, według teorii płynięcia proszków Jenike [1964], pozwalają określić parametry plastycznego płynięcia materiałów sypkich z wystarczającą do praktycznego zastosowania dokładnością i przewidzieć charakter płynięcia badanego materiału sypkiego. Parametry plastycznego płynięcia określają warunki w jakich materiał sypki przestaje zachowywać się jak ciało stałe i staje się podobny do cieczy [Schwedes 1996, Teunou i in. 1999].

Parametry plastycznego płynięcia materiałów skonsolidowanych takie, jak kohezja  $C$ , kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$ , efektywny kąt tarcia wewnętrznego  $\phi_E$ , wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_C$ , wyznacza się na podstawie krzywej uplastycznienia  $YL$  ( $YL$  – Yield Locus). Krzywa ta, przedstawiająca zależność  $\tau = f(\sigma)$ , jest miejscem geometrycznym wartości naprężeń normalnych  $\sigma$  i ścinających  $\tau$  powodujących płynięcie materiału uprzednio skonsolidowanego do określonej gęstości nasypowej działaniem konsolidującego naprężenia normalnego  $\sigma_E$  (rys. 1).

Dla materiałów idealnie sypkich (bezkohezyjnych  $C = 0$ ) położenie linii uplastycznienia  $YL$ , a więc wartość naprężeń ścinających  $\tau$  przy których następuje płynięcie materiału, zależy tylko od aktualnych naprężeń normalnych  $\sigma$ . Wcześniejsze, wyższe wartości naprężeń konsolidujących  $\sigma_E$  nie mają w tym wypadku znaczenia, a linia uplastycznienia  $YL$  pokrywa się z efektywną linią uplastycznienia  $EYL$  ( $EYL$  – Effective Yield Locus). Kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  w tych materiałach jest równy efektywnemu kątowi tarcia wewnętrznego  $\phi_E$ . Dla materiału kohezyjnego położenie

linii YL i wartość kohezji  $C$  zależy od wcześniejszych konsolidujących naprężeń normalnych  $\sigma_E$ . Tego rodzaju materiał jest reprezentowany przez rodzinę krzywych uplastycznienia, z których każda odnosi się do innej konsolidacji (gęstości nasypowej materiału) [Schulze 1996 a, b].

Jako charakterystyka sypkości szerokie uznanie zyskała funkcja płynięcia FF wprowadzona przez Jenike [1964], będąca zależnością wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_C$  od największego naprężenia konsolidacyjnego  $\sigma_1$ . Funkcja płynięcia FF charakteryzuje zdolność materiału do zakłóceń swobodnego wypływu ze zbiorników pod wpływem sił grawitacji [Teunou i Fitzpatrick 1999, 2000] i wykorzystywana jest przy projektowaniu zbiorników m.in. do określenia minimalnego wymiaru otworu wysypowego gwarantującego nie zakłócony wypływ materiału [Kobielak 1990]. Bardzo wygodnym parametrem do porównania jakościowego różnych materiałów sypkich jest zaproponowany przez Jenike i Carson (1985) indeks płynięcia  $ff_c$ , obliczany jako stosunek największego naprężenia konsolidacyjnego  $\sigma_1$  do wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_C$ . Materiały sypkie mogą być klasyfikowane zgodnie z ich zdolnością do płynięcia na podstawie wartości indeksu płynięcia  $ff_c$  w następujący sposób:

$ff_c < 2$	bardzo kohezyjne, brak płynięcia,
$2 < ff_c < 4$	kohezyjne, trudno płynące,
$4 < ff_c < 10$	słabo kohezyjne, łatwo płynące,
$10 < ff_c$	niekohezyjne, sypkie, swobodnie płynące.

## CEL I ZAKRES PRACY

W niniejszej pracy podjęto badania właściwości mechanicznych wybranych sypkich materiałów spożywczych w teście jednoosiowego ścinania z uwzględnieniem wpływu naprężenia konsolidującego.

W pracy wyznaczono parametry plastycznego płynięcia (kohezja, kinetyczny i efektywny kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, funkcja płynięcia) przy czterech poziomach naprężenia konsolidującego z zakresu 6÷16 kPa. Wartość maksymalnego naprężenia konsolidującego odpowiada maksymalnej wysokości złoża badanych materiałów wynoszącej około 8 metrów.

## METODYKA PRACY

### Materiał badawczy

Pomiary wykonano dla dwóch rodzajów preparatu białka sojowego (koncentrat i izolat) oraz dla dwóch rodzajów serwatki w proszku (serwatka słodka i zdemineralizowana). Materiały te reprezentują grupę białkowych produktów w proszku. Produkty sojowe różniły się między sobą składem chemicznym: koncentrat, oprócz 67% białka, zawierał znaczne ilości węglowodanów; izolat prawie całkowicie pozbawiony związków węglowodanowych zawierał 88% białka (tab. 1). Serwatki w proszku zawierające 11-11,5% białka różniły się między sobą zawartością laktozy i związków mineralnych (tab. 1).

Tabela 1. Skład chemiczny badanych materiałów sypkich (dane producenta)  
Table 1. Compositions of tested materials (of given producer)

Składnik Component	Koncentrat białka sojowego Soy protein concentrate	Izolat białka sojowego Soy protein isolate	Serwatka słodka Sweet whey powder	Serwatka zdeminielizowana Demineralized whey powder
	%			
Białko Protein	67	88	11,5	11
Węglowodany Carbohydrates	17	1	72 (laktoza) 72 (lactose)	81 (laktoza) 81 (lactose)
Błonnik Crude fibre	4	1	-	-
Woda Moisture	4	4	4	3
Tłuszcz Fat	1	1	1,5	1
Popiół Ash	7	3	7	1
Inne Other	-	2 (lecytyna) 2 (lecithin)	4	3

### Jednoosiowe ścinanie proszku

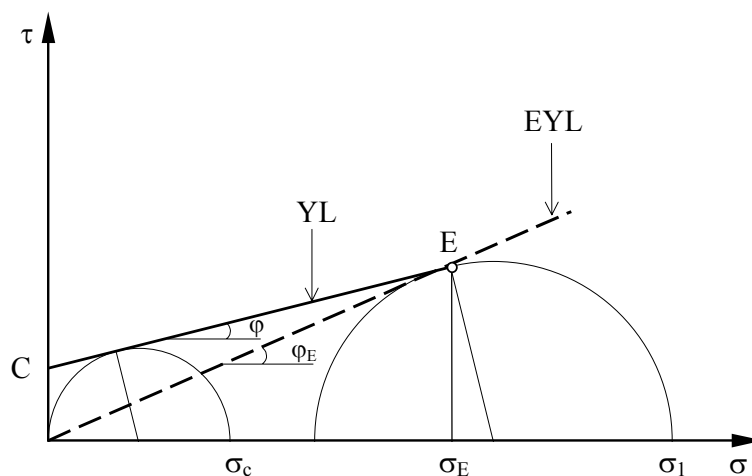
Badania przeprowadzono metodą bezpośredniego ścinania w aparacie przystosowanym do procedury pomiarowej zgodnej z teorią Jenike [Jenike 1964, Schulze 1996 a, b]. Stosowano komorę pomiarową o średnicy 95 mm i wysokości 50 mm. Do konsolidacji próbki stosowano normalne naprężenia  $\sigma_E$  – 6,43; 7,93; 10,85 i 16,10 kPa. Bezpośrednie dane z pomiarów – wartości siły ścinającej w zależności od przemieszczenia zapisywane były w formie elektronicznej w czasie każdego pomiaru.

Zgodnie z metodyką Jenike jeden pomiar pozwalał na wyznaczenie tylko jednego punktu leżącego na krzywej uplastycznienia YL. Do określania kolejnych czterech punktów leżących na tej samej krzywej uplastycznienia YL powtarzano trójfazową procedurę pomiaru przy tej samej wartości naprężenia normalnego konsolidującego  $\sigma_E$  i kolejno trzech mniejszych wartościach naprężenia normalnego  $\sigma$  podczas właściwego ścinania:

- wstępna konsolidacja pod działaniem naprężenia normalnego konsolidującego  $\sigma_E$  przez wykonanie 6 obrotów pokrywą do konsolidacji,
- konsolidacja materiału przez wstępne ścięcie przy tej samej wartości naprężenia normalnego konsolidującego  $\sigma_E$ , aż do uzyskania stanu ustalonego ścinania,
- odciążanie i właściwe ścinanie przy niższym naprężeniu normalnym  $\sigma$  do stanu ustalonego ścinania.

Powtarzając całą procedurę dla czterech naprężeń konsolidujących  $\sigma_E$  uzyskano dla każdego rodzaju materiału cztery krzywe uplastycznienia reprezentowane przez 4 pary ( $\sigma$ ,  $\tau$ ). Każdy pomiar wykonano w trzech powtórzeniach, a jako wynik przyjęto średnią arytmetyczną. Krzywe uplastycznienia aproksymowano linią prostą.

Dla każdej otrzymanej linii uplastycznienia YL wyznaczano parametry plastycznego płynięcia (rys. 1). Kohezję  $C$  wyznaczono jako punkt przecięcia linii uplastycznienia z osią naprężenia ścinającego  $\tau$ . Kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi$  wyznaczono jako kąt nachylenia linii uplastycznienia YL do osi naprężenia normalnego  $\sigma$ . Największe naprężenie ściskające  $\sigma_1$  wyznaczono jako punkt przecięcia osi naprężenia normalnego  $\sigma$  z kołem Mohra, stycznym do krzywej uplastycznienia w punkcie E (punkt o współrzędnej  $\sigma_E$ ). Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_c$  wyznaczono jako punkt przecięcia osi naprężenia normalnego  $\sigma$  z kołem Mohra, stycznym do linii uplastycznienia i przechodzącym przez początek układu współrzędnych. Efektywny kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi_E$  wyznaczono jako kąt nachylenia efektywnej krzywej uplastycznienia EYL do osi naprężenia normalnego  $\sigma$ .



Rys. 1. Linia uplastycznienia YL i efektywna linia uplastycznienia EYL  
Fig. 1. Yield locus YL and effective yield locus EYL

## OMÓWIENIE I DISKUSJA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Z analizy przebiegu linii uplastycznienia dla każdego rodzaju materiału stwierdzono, że kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi$  jest charakterystyczny dla danego proszku i zależy od wielkości naprężenia konsolidującego. Wielkość kinetycznego kąta tarcia nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego dla preparatów białka sojowego, natomiast w wypadku serwatki kąt ten nieznacznie maleje wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego (tab. 2).

Efektywny kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi_E$  jest stały, charakterystyczny dla danego materiału i niezależny od wielkości naprężenia konsolidującego. Średni efektywny kąt tarcia wewnętrznego dla danego rodzaju materiału wynosi odpowiednio:  $35,0^\circ$  dla koncentratu sojowego,  $33,4^\circ$  dla izolatu sojowego,  $46,2^\circ$  dla serwatki słodkiej i  $45,6^\circ$  dla serwatki zdemineralizowanej. Kąt  $\varphi_E$  uwzględnia wzrost kohezji w procesie konsolidacji. Wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego są wyższe od wartości kinetycznego

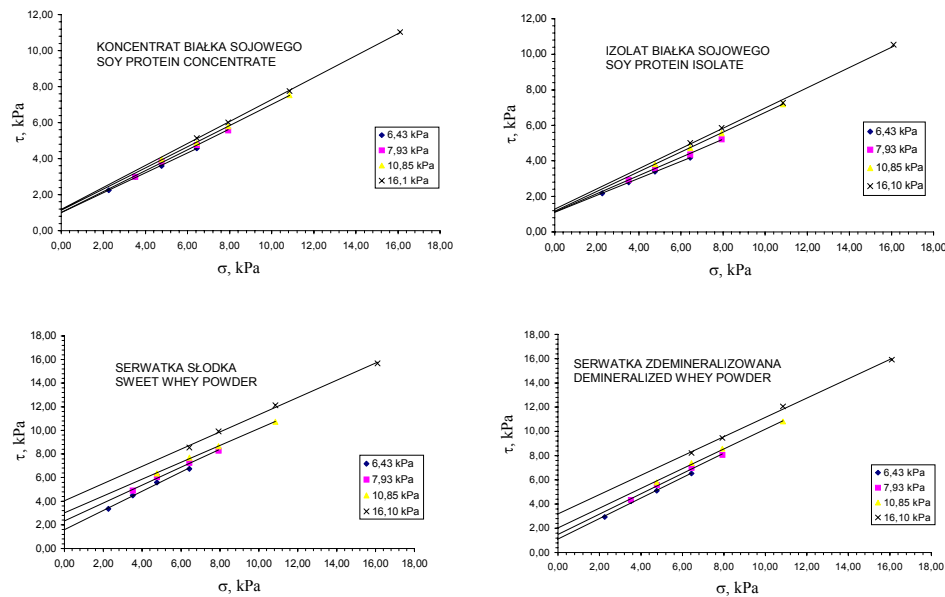
Tabela 2. Parametry plastycznego płynięcia badanych materiałów sypkich dla 4 naprężeń konsolidujących  $\sigma_E$ : 6,43 kPa, 7,93 kPa, 10,85 kPa, 16,10 kPaTable 2. Flow parameters of tested materials for 4 normal stress consolidating  $\sigma_E$ : 6,43 kPa, 7,93 kPa, 10,85 kPa, 16,10 kPa

Material Material	Naprężenie konsolidujące Normal consolidating stress	Kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego Kinetic angle of internal friction	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego Effective angle of internal friction	Kohezja Cohesion	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Unconfined yield strength	Największe naprężenie konsolidujące Major consolidating stress	Indeks płynięcia Flow index
	$\sigma_E$ (kPa)	$\varphi$ (°)	$\varphi_E$ (°)	C (kPa)	$\sigma_c$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$ff_c = \sigma_1/\sigma_c$
Koncentrat białka sojowego Soy protein concentrate	6,43	28,9	35,6	1,00	3,38	14,15	4,2
	7,93	30,1	35,4	1,02	3,52	17,64	5,0
	10,85	30,5	34,8	1,13	3,90	24,00	6,2
	16,10	31,4	34,4	1,18	4,20	35,71	8,5
Izolat białka sojowego Soy protein isolate	6,43	25,6	33,4	1,11	3,50	13,07	3,7
	7,93	27,1	33,4	1,13	3,70	16,40	4,4
	10,85	29,1	33,7	1,16	3,90	23,08	5,9
	16,10	29,7	33,1	1,27	4,40	34,12	7,8
Serwatka słodka Sweet whey powder	6,43	39,1	47,2	1,59	6,70	20,78	3,1
	7,93	37,2	47,3	2,33	9,30	24,73	2,7
	10,85	35,5	45,5	3,02	11,70	31,73	2,7
	16,10	36,1	45,0	4,03	15,90	47,11	3,0
Serwatka zdemineralizowana Deminerallized whey powder	6,43	40,2	45,8	1,12	4,80	20,56	4,3
	7,93	40,0	46,1	1,50	6,40	25,39	4,0
	10,85	39,2	45,4	2,03	8,60	33,75	3,9
	16,10	38,5	45,2	3,19	13,20	49,34	3,7

kąta tarcia wewnętrznego o 3÷7 stopni w wypadku preparatów sojowych i o 5÷10 stopni w wypadku proszków serwatkowych. Zarówno wielkości kinetycznego, jak i efektywnego kąta tarcia są wyższe w wypadku proszków serwatkowych niż w wypadku preparatów białka sojowego (tab. 2).

Linie uplastycznienia dla preparatów białka sojowego, oddalone od siebie przy wyższych wartościach naprężenia normalnego  $\sigma$ , zbliżają się do siebie wraz ze zmniejszającą się wartością  $\sigma$  i przecinają oś naprężenia ścinającego  $\tau$ , wyznaczając zbliżone wartości kohezji C (rys. 2). Przebieg linii uplastycznienia w wypadku serwatki jest inny. Zmniejszające się nachylenie linii uplastycznienia do osi  $\sigma$  wraz z rosnącym naprężeniem konsolidującym  $\sigma_E$  skutkuje rosnącym oddaleniem linii wraz ze zmniejszającym się naprężeniem normalnym  $\sigma$ . Analizowane linie uplastycznienia przecinają oś  $\tau$  w oddalonych od siebie punktach wyznaczając zróżnicowane wartości kohezji C (rys. 2).

Dla badanych materiałów wartości kohezji C rosną wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego. W wypadku preparatów białka sojowego wzrost kohezji pomiędzy najmniejszym i największym naprężeniem konsolidującym jest niewielki, tzn. na poziomie 18% dla koncentratu i 14% dla izolatu. Dla serwatki wzrost kohezji pomiędzy najmniejszym i największym  $\sigma_E$  jest bardziej znaczący i wynosi 154% dla serwatki słodkiej i 185% dla serwatki zdemineralizowanej (tab. 2).

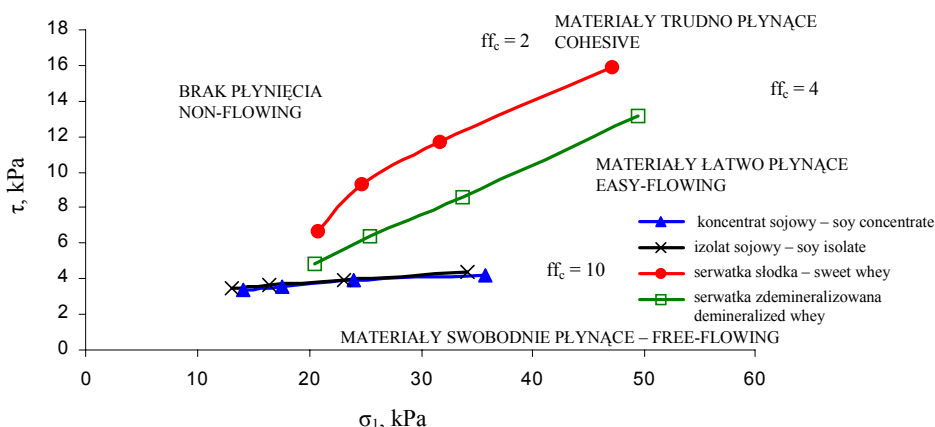


Rys. 2. Linie uplastycznienia badanych materiałów sypkich dla 4 naprężeń konsolidujących  $\sigma_E$ : 6,43 kPa, 7,93 kPa, 10,85 kPa, 16,10 kPa.  $\sigma$  – naprężenie normalne,  $\tau$  – naprężenie ścinające  
 Fig. 2. Yield locus of tested materials for 4 normal stress consolidating  $\sigma_E$ : 6,43 kPa, 7,93 kPa, 10,85 kPa, 16,10 kPa.  $\sigma$  – normal stress,  $\tau$  – shear stress

Podobnie jak kohezja, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_c$  uzależnione jest od przebiegu linii uplastycznienia. Niezależnie od rodzaju badanego preparatu zaobserwowano wzrost wartości  $\sigma_c$  wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$ , jednakże wzrost ten nie jest jednakowy dla badanych materiałów. Zmianie naprężenia konsolidującego od  $\sigma_E = 6,43$  kPa do  $\sigma_E = 16,10$  kPa odpowiadają następujące zmiany wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_c$ : o 24-26% dla koncentratu sojowego i izolatu sojowego, o 137% dla serwatki słodkiej, o 175% dla serwatki zdeminielizowanej (tab. 2).

Na rysunku 3 przedstawiono funkcje płynięcia badanych materiałów oraz zobrazowano rozkład zdolności do płynięcia badanych materiałów, dzieląc obszar wykresu na części odpowiadające granicznym wartościom indeksu płynięcia  $ff_c$ , zgodnie z kryterium podanym przez Jenike [Jenike i Carson 1985]. Indeks płynięcia  $ff_c$  dla badanych materiałów w stosowanym przedziale naprężenia konsolidującego zmieniał się w następujących zakresach: dla koncentratu białka sojowego 4,2-8,5, izolatu białka sojowego 3,7-7,8, serwatki słodkiej 2,7-3,1, serwatki zdeminielizowanej 3,7-4,3 (tab. 2). Funkcje płynięcia FF preparatów białka sojowego leżą w obszarze  $4 < ff_c < 10$ , natomiast funkcje płynięcia serwatek leżą całkowicie i prawie całkowicie w obszarze  $2 < ff_c < 4$ , co klasyfikuje badane materiały sypkie następująco:

- preparaty białka sojowego (koncentrat i izolat) – proszki słabo kohezyjne, łatwo płynące,
- serwatka słodka – proszek kohezyjny, trudno płynący,
- serwatka zdeminielizowana – proszek kohezyjny, trudno- lub łatwo płynący w zależności od wielkości naprężenia konsolidującego.



Rys. 3. Funkcja płynięcia FF badanych materiałów sypkich  
Fig. 3. Flow functions FF of tested materials

Funkcje płynięcia FF sojowych preparatów w proszku charakteryzują się niewielkim kątem nachylenia do osi największego naprężenia ściskającego  $\sigma_1$  (rys. 3). Związane jest to z niewielką zmianą wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_c$  wraz ze zmianą największego naprężenia ściskającego  $\sigma_1$ . Taki przebieg funkcji płynięcia i rosnąca wartość indeksu płynięcia  $ff_c$  wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego (tab. 2) wskazuje, że wraz ze wzrostem obciążenia panującego w zbiorniku (wysokości złoza w zbiorniku) zdolność do płynięcia w wypadku preparatów sojowych rośnie. Pewne zakłócenia swobodnego przepływu wzmocnionych wytrzymałościowo preparatów sojowych mogą wystąpić przy odpowiednio małych wysokościach złoza w zbiorniku. Znaczne nachylenie krzywych funkcji płynięcia do osi największego naprężenia ściskającego  $\sigma_1$  w wypadku proszków serwatkowych wskazuje na wyraźny wpływ konsolidacji na wzmocnienie wytrzymałościowe tych materiałów (rys. 3). W przybliżeniu stała wartość indeksu płynięcia wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego w wypadku obydwu serwatek (tab. 2) wskazuje na stałą zdolność do płynięcia proszków wzmocnianych wytrzymałościowo.

Podsumowując analizę parametrów plastycznego płynięcia uzyskanych z testów jednoosiowego ścinania można jednoznacznie scharakteryzować właściwości mechaniczne badanych materiałów sypkich.

Preparaty białka sojowego w proszku, koncentrat i izolat, wykazują bardzo zbliżone właściwości mechaniczne. Charakteryzują się niskim poziomem kohezji  $C$ , wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_c$  oraz zbliżonymi indeksu płynięcia  $ff_c$ , wartościami kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi_E$  i  $\varphi$  niezależnie od wartości naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$ . Parametry płynięcia  $C$ ,  $\sigma_c$  i  $\varphi_E$  zmieniają się nieznacznie i mogą być traktowane jako stałe w zakresie stosowanych naprężeń konsolidujących  $\sigma_E = 6,43 \div 16,10$  kPa. Funkcja płynięcia FF pozwala określić preparaty sojowe w proszku jako słabo kohezyjne, łatwo płynące, odznaczające się małą podatnością na wzmocnienie wytrzymałościowe przy konsolidacji, mogące sprawiać problemy przy przepływie tylko w określonych warunkach. Różnice w składzie chemicznym koncentratu i izolatu nie mają wpływu na ich właściwości mechaniczne.



Charakter mechaniczny serwatki w proszku jest diametralnie różny od charakteru preparatów sojowych. Serwatka słodka w proszku i serwatka zdeminielizowana w proszku charakteryzują się podobnymi właściwościami mechanicznymi i mogą być określone jako proszki spójne, spoiste. Kohezijność proszków serwatkowych zwiększa się wprost proporcjonalnie do wartości stosowanego naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$  w zakresie 6,43 ÷ 16,10 kPa (2,5-krotnemu wzrostowi  $\sigma_E$  odpowiada 2,5- i 2,8-krotny wzrost kohezji). Proszki te, pod wpływem konsolidacji, stają się również bardzo wytrzymałe (wartość  $\sigma_c$  proporcjonalna do  $\sigma_E$ ). Pod względem zdolności do płynięcia, na podstawie funkcji płynięcia FF i indeksu płynięcia  $ff_c$ , proszki serwatkowe można określić jako trudno płynące. Oznacza to, że preparaty serwatkowe charakteryzuje duża wytrzymałość, zdolność do tworzenia i utrzymywania zakłóceń, a tym samym duża trudność w przepływie grawitacyjnym. W wypadku tych preparatów może wystąpić zahamowanie częściowe (tworzenie tuneli) lub całkowite (tworzenie sklepień nad otworem wylotowym) przepływu materiału, zaleganie materiału w zbiorniku, niejednorodny charakter wypływu materiału, zwiększone parcie na ściany zbiornika pod wpływem zawalenia się tuneli. Zmiana w składzie chemicznym serwatki słodkiej i serwatki zdeminielizowanej ma wpływ na ich właściwości mechaniczne. Serwatka słodka, charakteryzująca się wyższymi wartościami parametrów C,  $\sigma_c$ ,  $\varphi_E$  i niższymi  $ff_c$ , wykazuje większą zdolność do zakłóceń swobodnego wypływu ze zbiorników pod wpływem sił grawitacji.

## PODSUMOWANIE

Test jednoosiowego ścinania pozwolił jednoznacznie scharakteryzować właściwości płynięcia badanych materiałów sypkich i wykazał diametralnie różne właściwości mechaniczne preparatów sojowych i serwatki w proszku. Funkcja płynięcia określa preparaty sojowe w proszku jako słabo kohezyjne, łatwo płynące, mało podatne na wzrost wytrzymałości przy konsolidacji. Preparaty serwatkowe pod względem zdolności do płynięcia, na podstawie funkcji płynięcia, są proszkami kohezijnymi, trudno płynącymi, podatnymi na wzrost wytrzymałości przy konsolidacji.

## PIŚMIENNICTWO

- Horabik J., 2001. Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania. *Acta Agrophys.* 54, 36-82.
- Jenike A.W., 1964. Storage and flow of solids. *Bulletin 123 Eng. Experiment Station 53 (26)*, University of Utah, USA.
- Jenike A. W., Carson J., 1985. Measurement principles of the flowability of powders. *Adv. Ceramic 21*, 759-766.
- Knowlton T.M., Carson J.W., Klinzing G.E., Yang W.C., 1994. The importance of storage, transfer and collection. *Chem. Eng. Prog.* 90, 44-54.
- Kobiela S., 1990. Przyrządy i metodyka pomiaru parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach. *Pr. Nauk. Inst. Budown. P. Wroc.* 24, 58, 1-49.
- Peleg M., 1985. The role of water in the rheology of hygroscopic food powders. In: *Properties of Water in Foods*. Red. D. Simataos, J.L. Multon. Martinus Nijhoff Publishers Dordrecht, 393-404.

- Schubert H., 1987 a. Food Particle Technology. Part I: Properties of Particles and Particulate Food Systems. *J. Food Eng.* 6, 1, 1-32.
- Schubert H., 1987 b. Food Particle Technology. Part II: Some specific cases. *J. Food Eng.* 6, 1, 83-102.
- Schulze D., 1996 a. Measuring powder flowability: a comparison of test methods Part I. *Powder Bulk Eng.* 10, 45-61.
- Schulze D., 1996 b. Measuring powder flowability: a comparison of test methods Part II. *Powder Bulk Eng.* 10, 17-28.
- Schwedes J., 1996. Measurement of flow properties of bulk solids. *Powder Technol.* 88, 285-290.
- Schwedes J., 2002. Consolidation and flow of cohesive bulk solids. *Chem. Eng. Sci.* 57, 287-294.
- Teunou E., Fitzpatrick J.J., 1999. Effect of relative humidity and temperature on food powder flowability. *J. Food Eng.* 42, 109-116.
- Teunou E., Fitzpatrick J.J., 2000. Effect of storage time and consolidation on food powder flowability. *J. Food Eng.* 43, 97-101.
- Teunou E., Fitzpatrick J.J., Synnott E.C., 1999. Characterisation of food powder flowability. *J. Food Eng.* 39, 31-37.

## FLOW PROPERTIES OF FOOD PARTICULATE MATERIALS

**Abstract.** In this paper the flow properties for food particulate materials (two kinds of soy protein and two kinds of whey powder) were determined. Experiments were performed using shear tester according to Jenike procedure at four levels of normal consolidating stress at the range  $6 \div 16$  kPa. The flow parameters (cohesion, angle of internal friction, unconfined yield strength and flow function) are calculated for each of materials. They are then applied to estimate powder flowability. All flow parameter values differed significantly between soy protein and whey powders. Soy proteins were found to be non-cohesive, easy – flowing powders, then whey powders were found to be cohesive, difficult – flowing powders.

**Key words:** flow function, shear test, soy protein, whey powder

*E. Domian, Ł. Milczarski, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159 c, 02-787 Warszawa*