

Alicja BIEL-TYRALSKA, Tomasz TYRALSKI

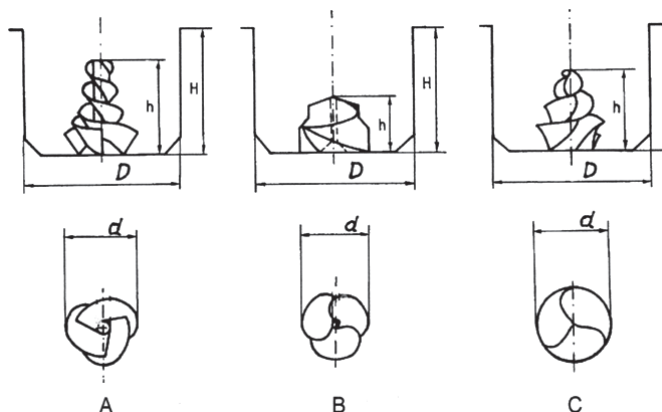
e-mail: alicja.biel-tyralska@p.lodz.pl

Instytut Papiernictwa i Poligrafii, Politechnika Łódzka, Łódź

Wirniki helikoidalne do rozwłókniania makulatury przy wysokim stężeniu

Wstęp

Wirniki helikoidalne charakteryzują się stosunkowo dużą średnicą i znaczną wysokością w stosunku do wymiarów wanny rozwłókniacza wirowego. Są tak ukształtowane, że w swojej górnej części wywołują ruch masy w kierunku pionowym ku dołowi wanny, natomiast przy dnie wanny wirnik wyrzuca masę na zewnątrz. W ten sposób wywołana zostaje cyrkulacja gęstej masy w wannie przy stosunkowo małej częstotliwości obrotów wirnika śrubowego, pomimo obniżonej zdolności gęstej masy do płynięcia. Na rys. 1 przedstawiono poglądowo porównanie podstawowych wymiarów wirników helikoidalnych w odniesieniu do wymiarów wanny dla wirników helikoidalnych różnych firm (Voith, Grubens, Lamort).



Rys. 1. Geometria rozwłókniaczy z wirnikami helikoidalnymi (Voith, Grubens, Lamort)

Stosunek średnicy wanny do średnicy wirnika D/d zmienia się w zakresie od ok. 2,0÷2,8, a stosunek wanny do wysokości wirnika H/h zmienia się w zakresie ok. 1,35÷2,35. Wartości są ściśle zależne od przyjętej geometrii wirnika.

Dla ustalenia wartości optymalnych w danych warunkach konieczne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych, w szczególności badań modelowych. Istnieje uzasadnione ekonomicznie zapotrzebowanie na modernizację rozwłókniaczy w bardzo licznych małych papierniach, w których aktualnie wykorzystuje się rozwłókniacze niskostężeniowe pracujące najczęściej w zakresie stężeń 3÷5%. Zużycie energii jest w takim przypadku bardzo duże i mało efektywne, gdyż w wannie rozwłókniacza wirowego miesza się głównie wodę. Podwyższenie stężenia tylko o kilka procent umożliwia zwiększenie wydajności rozwłókniacza i tym samym zmniejszenie jednostkowego zapotrzebowania energii. Jednakże wiąże się to z koniecznością zmiany geometrii i parametrów wirnika oraz weryfikacją obliczeniową możliwości istniejącego układu napędowego w szczególności analizy istniejącej rezerwy mocy silnika lub też uzasadnionej potrzeby zaprojektowania i zabudowy nowego układu napędowego.

Charakterystyka reologiczna procesu rozwłókniania

Zastosowanie wyższych stężeń w rozwłókniaczu powoduje intensywniejszy kontakt i tarcie pomiędzy cząstkami zawiesiny w trakcie cyrkulacji masy w wannie rozwłókniacza. Na kinetykę rozwłókniania największy wpływ wywiera geometria wirnika, jego częstota obrotów, stężenie zawiesiny [Göttsching i Pakarinen, 2000; Tyralski i Biel-Tyralska,

1997; 2004; 2005; 2008] oraz także kształt wanny rozwłókniacza [Ruffo i Malton, 2008].

Roux i Bloch [2004] w swoich rozważaniach dotyczących modelowania kinetyki procesu dezintegracji w rozczyntaniu i rozwłóknianiu masy makulaturowej poddali początkowo szerokiej analizie model zaproponowany przez Benningtona i in. [1998].

Bennington i in. [1998] do analizy procesu rozwłókniania pod kątem poprawy jego efektywności przyjęli model, w którym, zgodnie z istniejącymi poglądami [Tyralski, 1980] przyjęli, że interakcja pomiędzy wirnikiem i cząstkami stałymi masy włóknistej wywiera największy wpływ na kinetykę rozwłókniania i wprowadzili do tego modelu sumaryczną powierzchnię kontaktu cząstek stałych zawieszony z łopatkami wirnika (*total fibre-rotor contact area*) zmieniającą się w czasie t . Powierzchnia ta wynika z geometrii wirnika i znajomości maksymalnej wysokości zawieszony w kontakcie z wirnikiem. Maksymalna całkowita powierzchnia danego wirnika jest osiągnięta, gdy masa jest w kontakcie z całym wirnikiem. Chociaż zasadnicze siły mechaniczne i hydrodynamiczne, działające na rozwłókniany surowiec, mają miejsce głównie w strefie wirnika gdzie występują maksymalne gradienty prędkości, to jak stwierdzili w swoim modelu Roux i Bloch [2004] nie można pominąć tego, że jeśli rośnie stężenie masy to siły tarcia, aktywne w procesie rozwłókniania, są obecne nie tylko w otoczeniu rotora, ale także w całej objętości i skrócenie czasu rozwłókniania można uzyskać przez zwiększenie wprowadzonego do analizy współczynnika ścinania (uogólnienie lepkości pozornej), który ma uwzględniać wszystkie siły tarcia (ciało stałe-ciało stałe i ciało stałe-ciecz). Tyralski i Biel-Tyralska [2004; 2008] stwierdzili, że opory ruchu w wannie rozwłókniacza muszą bilansować się z energią pompowania i wartością strumienia objętości recykulującej zawieszony ustala się samorzutnie, czyli że parametry geometryczne i kinematyczne wirnika oraz opory ruchu gęstej masy włóknistej o stężeniu c i lepkości pozornej μ_a decydują o intensywności cyrkulacji (częstość cyrkulacji) masy w wannie rozwłókniacza. Podstawowa trudność związana jest z wyznaczeniem wartości lepkości pozornej μ_a , która zależy zarówno od stężenia zawieszony, jak i od prędkości wirnika (szybkości ścinania). Dopiero po osiągnięciu pewnej szybkości ścinania $\dot{\gamma}$, co wiąże się z zaangażowaniem odpowiedniej ilości energii (na mieszanie). Masa włóknista osiąga tzw. stan fluidyzacji, w którym struktury włókniste zostają na tyle zniszczone, że umożliwiają przepływ (ściananie) [Wikstroem i in., 2002; Tyralski i Biel-Tyralska, 2004; 2008]. Wprowadzenie do analizy współczynnika stężenia (*consistency factor*) m [Tyralski i Biel-Tyralska, 2008] umożliwia obliczenie częstości obrotów wirnika wymaganej do fluidyzacji masy włóknistej o danym stężeniu. Jeśli wirnik wytwarza intensywniejszą cyrkulację masy w wannie rozwłókniacza, wówczas poszczególne elementy masy będą częściej wchodziły z nim w kontakt w jednostce czasu, czego rezultatem będzie intensywniejsze rozwłóknianie. Intensywność cyrkulacji [Tyralski, 1980] jest charakteryzowana częstością cyrkulacji i , która jest stosunkiem wydajności objętościowej wirnika Q [m^3/s] i objętości roboczej wanny rozwłókniacza V [m^3].

Powierzchnia łopatek charakteryzuje jeden z istotnych parametrów geometrycznych wirnika, ponieważ w strefie przyściennej łopatek wirnika występują duże gradienty prędkości, zależne zarówno od geometrii wirnika (jego zdolności pompującej), jak i od lepkości pozornej masy włóknistej czyli od stężenia masy i szybkości ścinania. Lepkość pozorna wpływa bezpośrednio na siły tarcia (naprężenia styczne) w przepływie cyrkulacyjnym przez wirnik i wannę.

Efektywność rozwłókniania jest zatem zależna od parametrów geometrycznych i kinematycznych rozwłókniacza oraz od wymaganego czasu

t_r dla osiągnięcia pożądanego stanu rozwłóknienia masy w rozważanym przypadku. Efektywność energetyczną procesu rozwłóknienia określa jednoznacznie wymagane jednostkowe zużycie energii SEC (*Specific Energy Consumption*) w danych warunkach geometrycznych (wirnik, wanna), kinematycznych (częstość obrotów wirnika) i technologicznych (stężenie i rodzaj masy).

Siła wywierana przez łopatki wirnika na rozwłókniany materiał

Kinetyka procesu rozwłóknienia zależy m.in. od wytrzymałości materiału T_M (np. wytrzymałości na rozciąganie w stanie mokrym, N/m), oraz od siły F_R wywieranej przez wirnik na materiał (siła przypadająca na jednostkową długość, wywierana przez łopatkę wirnika, N/m) [Bennington i in., 1998]

W przypadku trudnorozwłóknialnych surowców wielomateriałowych takich jak np. makulatura z opakowań po płynach spożywczych problem selektywnego rozwłóknienia jest bardziej złożony. Oprócz wpływu ilości bezpośrednich oddziaływań (kontaktów) wirnika na cząstki stałe zawiesiny istotne jest również to, że wirnik wywołuje cyrkulację masy, z którą związane są naprężenia styczne wpływające na obróbkę rozwłókniającą i rozdrabniająca cząstek stałych zawiesiny. Wartość tych naprężeń jest zależna od lepkości pozornej zawiesiny i od szybkości ścinania.

Jeśli rozwłókniacz wirowy zostanie potraktowany jako mieszalnik, wówczas w zakresie ruchu burzliwego liczba mocy (mieszania):

$$N_p = \frac{P}{\rho n^3 d_m^5} \quad (1)$$

jest niezależna od liczby *Reynoldsa* i tym samym od lepkości zawiesiny, a siła F_R [N/m] wyraża się następująco [Bennington i in., 1998]:

$$F_R = \frac{N_p d_m^4 n^2 \rho}{\pi j H_c} \quad (2)$$

gdzie:

d_m – średnia średnica wirnika, [m]

H_c – wysokość wirnika będąca w kontakcie z zawiesiną, [m]

j – liczba łopatek wirnika

M – moment oporu działający na wirnik, [N·m]

n – częstość obrotów wirnika, [1/s]

$P = nM$ – moc potrzebna do napędu wirnika, [W]

ρ – gęstość masy papierniczej, [kg/m³]

Przy małych stężeniach masy włóknistej tworzy się lej i zawiesina napływa w wannie na wirnik (wchodzi w kontakt z wirnikiem) w jakimś punkcie pośrednim jego wysokości, czyli nie cały wirnik jest wówczas w kontakcie z masą. Punkt kontaktu zmienia się zależnie od stężenia masy i częstości obrotów wirnika i musi być mierzony.

Przy wzroście stężenia masa staje się coraz bardziej gęsta i jej lepkość odpowiednio rośnie. Przepływ takiej masy jest znacznie powolniejszy, uwidaczniają się pulsacje masy generowane przez łopatki. Lej zanika i cała wysokość wirnika śrubowego jest w kontakcie z zawiesiną. Przy dalszym wzroście stężenia ruch masy może zanikać, pomimo że wirnik się obraca. Stężenie masowe, przy którym to zachodzi, zależy od rodzaju masy. W przypadku rozwłókniacza laboratoryjnego firmy *Kadant-Lamort* i masy makulaturowej z tektury falistej ze znacznym udziałem pociętych opakowań po płynnej żywności ma to miejsce przy stężeniach powyżej ok. 10%.

Przy wysokim stężeniu występuje ruch laminarny ($Re < 400$) i liczba mocy (mieszania) jest zależna od liczby *Reynoldsa*, a więc od lepkości masy włóknistej. Zależność na siłę F_R ma wtedy następującą postać [Bennington i in., 1998]:

$$F_R = \frac{K_L \mu_a d_m^2 n}{\pi j H_c} \quad (3)$$

gdzie:

K_L – stała zależna od geometrii wirnika w przepływie laminarnym,

$Re_n = \frac{n d_m^2 \rho}{\mu_a}$ – liczba *Reynoldsa*

W zależności tej nieznana jest wartość stałej K_L , a przede wszystkim lepkość pozorna μ_a zależna zarówno od stężenia zawiesiny jak i od szybkości ścinania, czyli od częstości obrotów wirnika.

Identyfikacja reologiczna gęstych mas włóknistych

W celu uzyskania możliwości identyfikacji reologicznej gęstych mas włóknistych o stężeniach 8÷16% zastosowano metodę quasi-statyczną z wykorzystaniem reometru z sondą łopatkową, w którym dla jednoznacznej interpretacji wykorzystano proste ścinanie.

Na wewnętrznej powierzchni cylindrycznego pojemnika rozmieszczono również kilka łopatek o wysokości 10 mm. Szczelina pomiędzy wierzchołkami łopatek sondy i pojemnika wynosiła 30 mm. Po dokładnym wypełnieniu przestrzeni pomiarowej przyrządu masą do poziomu górnej ścianki sondy przykładano do sondy moment obrotowy o stopniowo rosnącej wartości. Stopniowo wzrastające obciążenie rotora uzyskiwano za pomocą śrutu ołowianego lub wody, dostarczanych do naczynia podwieszono na ciężnie połączonym (poprzez rolkę) z ramieniem dźwigni. W momencie zainicjowania ruchu obrotowego sondy łopatkowej określano wartość momentu skręcającego M . Pomiar wartości momentu przeprowadzano kilkakrotnie dla każdego stężenia i określano jego wartość średnią. Pozwoliło to wyznaczyć wartość naprężenia ścinającego τ_d niszczącego strukturę włóknistą w zawieszynie dla masy włóknistej o danym stężeniu i gęstości ρ w oparciu o to lepkość pozorną dla danej szybkości ścinania zgodnie ze wzorem *Newtona*. Na tej podstawie można określić współczynnik stężenia:

$$m = \sqrt{\frac{\tau_d}{\rho}} \quad (4)$$

Moc wymagana do napędu wirnika helikoidalnego

Teoretyczną wysokość podnoszenia wirnika śrubowego H_i o przepływie osiowym w górnej części wirnika i promieniowym w dolnej części można wyznaczyć korzystając z równania *Eulera* dla pomp wirrowych. Wydajność objętościowa Q wirnika w największym stopniu zależy od częstości obrotów wirnika n oraz od skoku S łopatek śrubowych. Moc, jakiej wymaga wirnik dla zapewnienia cyrkulacji masy w wannie (Rys. 2), jest iloczynem wysokości podnoszenia H wirnika helikoidalnego oraz jego wydajności objętościowej Q . Wykorzystując odpowiednio te związki wyznaczono poniższą zależność na pobór mocy przez wirnik

$$P = \frac{\pi^2 d_1^2}{4\eta} \rho n^3 S (1 - \psi) \left[\pi^2 d_2^2 - \frac{d_1^2}{4h_2} (1 - \psi) \text{Sctg}\beta_2 \right] \quad (5)$$

gdzie:

d_1, d_2 – średnice zewnętrzne wirnika odpowiednio w jego części górnej o przepływie osiowym oraz w jego części dolnej o przepływie promieniowym, [m]

d_1' – średnica wewnętrznego cylindra w części wirnika o przepływie osiowym

h_2 – wysokość łopatek w części wirnika o przepływie promieniowym, [m]

S – skok łopatek helikoidalnych w części wirnika o przepływie osiowym, [m]

β_2 – kąt nachylenia łopatki względem prędkości unoszenia u_2 na średnicy d_2

η – sprawność hydrodynamiczna wirnika helikoidalnego

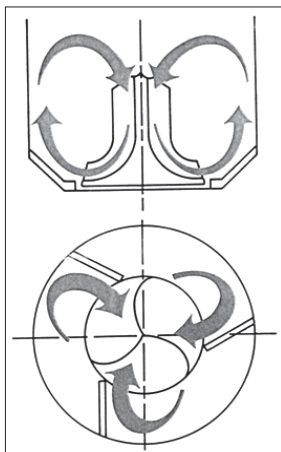
$\psi = (d_1'/d_1)^2$ – współczynnik uwzględniający zmniejszenie przekroju przepływowego w górnej części wirnika o przepływie osiowym

Równ. (5) uwidacznia m.in. celowość zastosowania przetwornicy częstotliwości (falownika) do zmiany częstości obrotów wirnika w poszczególnych fazach procesu rozwłóknienia. Można w ten sposób zaoszczędzić znaczne ilości energii.

W powyższej analizie nie można jednak pomijać oporów ruchu w wannie rozwłókniacza oraz w kanałach międzyłopatkowych wirnika. Muszą się one bilansować z energią zużywaną przez wirnik na zapew-

nienie wymaganej cyrkulacji zawiesiny Q_w . Straty energii, czyli jej rozpraszanie (dysypacja), związane z mechanicznym oddziaływaniem na rozwłóknianą masę włóknistą, głównie wskutek oddziaływania naprężeń ścinających τ , determinują jednocześnie opory ruchu. Naprężenia te odpowiadają również za tarcie między włóknami i cząstkami stałymi, które powoduje rozwłóknianie i rozdrabnianie cząstek zawiesiny.

Parametry geometryczne i kinematyczne wirnika oraz opory ruchu gęstej masy włóknistej o danym stężeniu C [% lub g/dm^3] i dynamicznej lepkości pozornej μ_a decydują o częstości cyrkulacji i masy włóknistej w wannie rozwłóknacza, a w rezultacie wpływają również na pobór mocy. Na rys. 2 przedstawiono jest schemat tej cyrkulacji.



Rys. 2. Schemat cyrkulacji masy w wannie rozwłóknacza z wirnikiem

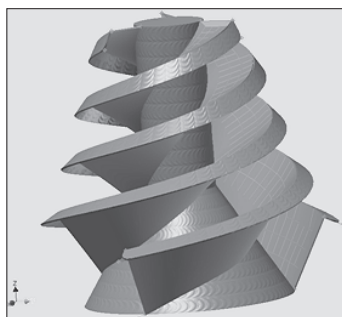
Program eksperymentalnych badań modelowych

Uwzględnienie ww. czynników wpływających na intensywność cyrkulacji masy i pobór mocy jest możliwe tylko na drodze eksperymentalnej w badaniach modelowych. Podstawowa zależność uzyskiwana tą drogą to przebieg zmiany liczby mocy N_p w funkcji liczby *Reynoldsa* Re_n . W tym celu konieczne jest przeprowadzenie pomiarów naprężenia stycznego τ oraz lepkości pozornej μ_a przy zmianie szybkości ścinania na zbudowanym we własnym zakresie reometrze cylindrycznym do mas gęstych. Umożliwia to utworzenie wykresu $\mu = f(\dot{\gamma})$ i następnie wyznaczenie lepkości pozornej odpowiadającej szybkości ścinania $\dot{\gamma} = kn$ w sąsiedztwie wirnika (gdzie $k = 13$).

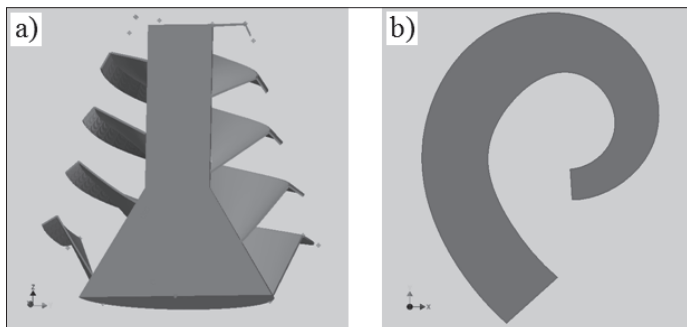
Metoda projektowania wirników helikoidalnych

Opracowana metoda projektowania wirników helikoidalnych pozwala na indywidualny dobór wirnika helikoidalnego (Rys. 3) w zależności od rodzaju masy makulaturowej, jej stężenia oraz wielkości wanny rozwłóknacza [Tyrański i Biel-Tyrańska, 2004; 2005; 2008]

Rys. 4a przedstawia przekrój wirnika helikoidalnego płaszczyzną przechodzącą przez oś obrotu. Wirnik składa się z korpusu, zbudowanego z części walcowej oraz stożkowej. Trzy łopatki wirnika składają się z wygiętych blach. Każda łopátka jest spawana z dwóch wygiętych blach (łopatki i zewnętrznego spojlera). Skok łopatki stanowi 4/5 wysokości zwiniętej łopatki. Rozwinięcie



Rys. 3. Trójwymiarowy model wirnika helikoidalnego do rozwłókniania mas makulaturowych o wysokim stężeniu [Biel-Tyrańska i Tyrański, 2013]



Rys. 4. Przekrój trójwymiarowego modelu wirnika helikoidalnego (a) oraz rozwinięcie do płaskiego wzoru łopatki wirnika (b) [Biel-Tyrańska i Tyrański, 2013]

łopatki wirnika helikoidalnego do płaskiego wzoru przedstawiono są na rys. 4b.

Podsumowanie

Współczynnik stężenia m , który stanowi parametr reologiczny zawiesiny włóknistej, umożliwia korelację wyników badań modelowych rozwłóknaczy wysokostężeniowych, zarówno w przepływie laminarnym, jak i turbulentnym. W szczególności możliwe jest obliczenie przybliżonej wartości lepkości pozornej zawiesiny włóknistej o danym stężeniu przy określonej częstości obrotów wirnika. Im mniejsza jest wartość lepkości pozornej, tym mniejsza jest efektywność rozwłókniania oraz usuwania i rozdrabniania farby drukarskiej. Przedstawione zależności dają również możliwość wyznaczenia prędkości wirnika wymaganej dla fluidyzacji gęstej masy włóknistej o danym stężeniu oraz moc wymaganą do napędu wirnika helikoidalnego.

Jednym z ważniejszych parametrów wpływających na efektywność rozwłókniania przy wysokim stężeniu jest częstość cyrkulacji, zależna od strumienia objętości masy włóknistej pompowanej przez wirnik. Zdolność wirnika helikoidalnego do wywołania odpowiednio intensywnej cyrkulacji gęstej masy włóknistej w wannie rozwłóknacza zależy w sposób zasadniczy od złożonej geometrii powierzchni śrubowej łopatek oraz od właściwości reologicznych zawiesiny włóknistej, które charakteryzuje współczynnik stężenia m .

Sprawność hydrauliczna wirnika śrubowego zależy w znacznym stopniu od optymalnego doboru kąta pochylenia łopatki β zarówno w górnej części wirnika zapewniającej przepływ osiowy jak i w dolnej realizującej przejście do przepływu promieniowego. Wirniki o zmiennym kącie pochylenia łopatki β i płynnie zmieniającym się zarysie zewnętrznym wirnika (Rys. 3) zapewniają wysoką sprawność pompowania gęstej zawiesiny. Prowadzone dalsze badania w zakresie reologii i hydrodynamiki rozwłókniania przy średnim i wysokim stężeniu zmierzają m.in. do lepszego poznania wpływu parametrów geometrycznych, kinematycznych i technologicznych na częstość cyrkulacji masy włóknistej oraz związane z tym rozkłady szybkości ścinania w wannie rozwłóknacza.

LITERATURA

- Biel-Tyrańska A., Tyrański T., 2013. Przerób opakowań papierowych po płynach spożywczych. *Przegl. Papier.*, **69**, nr 3, 159-165
- Bennington C.P.J., Smith J.D., Sui O.S., 1998. The effect of mechanical action on waste paper defibering and ink removal in repulping operations. *J. Pulp Paper Sci.*, **24**, 341-348
- Göttsching L., Pakarinen H., 2000. *Recycled fiber and deinking*. Fapet Oy, Helsinki, 100
- Ruffo R., Malton S., 2008. Energy saving in stock preparation for recycled paper. *Appita J.*, **61**, nr 4, 277-283
- Roux J.-C., Bloch J.-F., 2004a. Krótki przegląd operacji procesu dezintegracji. Cz. 1. Operacje rozczyniania i rozwłókniania. *Przegl. Papier.*, **60**, nr 4, 203-210
- Roux J. C., Bloch J. F., 2004b. Krótki przegląd operacji procesu dezintegracji. Cz. 2. Rozczynianie - kluczowa operacja w odbarwianiu makulatury. *Przegl. Papierniczy*, **60**, nr 5, 241-245
- Tyrański T., 1980. Maszyny do przygotowania masy papierniczej i reologia zawiesin włóknistych. Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź, 314
- Tyrański T., Biel-Tyrańska A., 1997. Energooszczędne rozczynianie i rozwłóknianie. *Przegl. Papier.*, **53**, nr 5, 297
- Tyrański T., Biel-Tyrańska A., 2004. The analysis of helical-rotor parameters for wastepaper pulping at high consistency. *Wbl. Papierfabr.*, **2**, 6-13
- Tyrański, T. Biel-Tyrańska, A., 2005. The disintegration of the wastepaper furnish at medium and high consistency. *Inż. Ap. Chem.*, **44**, nr 3s, 84-87
- Tyrański T., Biel-Tyrańska A., 2008. Rozwłóknianie makulatury przy średnim i wysokim stężeniu. *Przegl. Papier.*, **64**, nr 7, 379-390
- Wikstroem T., Roenmark Y., Rasmuson A., 2002. A new correlation for the onset of fluidization in pulp suspensions. *Nordic Pulp Paper Research J.*, **17**, 374-381. DOI: 10.3183/NPPRJ-2002-17-04-p374-381

Praca została wykonana w ramach projektu „Energooszczędny system elastycznego przygotowania mas papierniczych z surowców różnicowanej rozwłóknialności”. Projekt był realizowany w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka 2007-2013. Działanie 1.3: Wsparcie projektów B+R na rzecz przedsiębiorców realizowanych przez jednostki naukowe. Poddziałanie 1.3.1. Projekty rozwojowe.