

CHARAKTERYSTYKI ENERGETYCZNE POMP WYPOROWYCH TRANSPORTUJĄCYCH CIECZE SPOŻYWCZE

Wojciech Ratajczak

Zakład Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności, Politechnika Poznańska

Streszczenie. Przedmiot opracowania stanowi analiza parametrów pracy rotacyjnych pomp wyporowych, w zależności od parametrów reologicznych transportowanej cieczy. W pracy po wskazaniu aktualnego stanu wiedzy w zakresie pompowania cieczy spożywczych o dużej lepkości przedstawiono wyniki własnych badań eksperymentalnych pompy obrotowo-krzywkowej CPA-5 transportującej syrop ziemniaczany w różnych temperaturach. Zmiany właściwości reologicznych syropu uzyskiwano w wyniku oddziaływań termicznych. Na podstawie tych badań sporządzono charakterystyki energetyczne oraz dokonano analizy zależności pomiędzy parametrami reologicznymi syropu ziemniaczanego, a uzyskanymi przebiegami charakterystyk. Stwierdzono pogarszanie się wszystkich charakterystyk ze wzrostem lepkości syropu w przyjętych w badaniach warunkach. Istotnym spostrzeżeniem jest też niska sprawność badanej pompy, pomimo, że producent w zastosowaniach pompy rekomendował ją również do transportu syropu ziemniaczanego. Podjęto też próbę ilościowego opisu tych zależności, prezentując formułę zweryfikowaną pozytywnie wynikami badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: reologia, pompowanie, płyny spożywcze, charakterystyki pomp, pompy rotacyjne

Wykaz oznaczeń

- H – wysokość podnoszenia pompy (m),
- Q – wydajność pompy ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- P_t – ciśnienie na odcinku tłocznym rurociągu (MPa),
- N_w – moc zmierzona na wale pompy (W, kW),
- η – sprawność pompy,
- μ – lepkość dynamiczna cieczy (Pa·s).

Wprowadzenie

Stan wiedzy dotyczący pompowania cieczy spożywczych o dużej lepkości zarówno newtonowskich jak i nienewtonowskich jest skromny. Większość dostępnych opracowań dotyczących pompowania cieczy lepkich dotyczy przetłaczania produktów naftowych, ropy, olejów przemysłowych smarów itp. Niektóre ogólne zależności wykorzystywane są również w projektowaniu układów pompowych w przemyśle spożywczym. Jednakże ze względu na dużą różnorodność własności cieczy stosowanych w przemyśle spożywczym, dane uzyskane z pompowania pochodnych ropy naftowej są dalece niewystarczające. Również i pompy dla przemysłu spożywczego tworzące odrębną grupę pomp są w cieniu pomp wytwarzanych dla tzw. „wielkiego przemysłu”. Ilościowo, w przemyśle spożywczym przeważają pompy wirowe. Jednakże obszar ich zastosowania do cieczy o dużej lepkości jest ograniczony. Dla produktów takich jak masa czekoladowa, sery topione oraz twarożki, miód, melasa i.t.p. stosuje się przeważnie pompy wyporowe: krzywkowe, zębate, śrubowe, membranowe, perylstatyczne. Większość z tych pomp produkowanych jest za granicą. W Polsce, ważnym producentem pomp dla przemysłu spożywczego jest Spomasz Zamość. W ofercie swojej ma tylko 1 typ pompy wyporowej, pompę krzywkową (Spomasz Zamość S.A. 2013). Popularne w przemyśle spożywczym są pompy śrubowe produkowane m.in. w firmie TOFAMA S.A., które wykonywane są również w wersji dla przemysłu spożywczego (TOFAMA S.A. 2012). Również firma Tristan Polska Sp.z o.o. ma w ofercie pompy odśrodkowe mogące transportować m. in. koncentraty z mięszem, moszcze, syropy (Fristan Polska, 2013).

Opracowując charakterystyki pomp producenci nie wykorzystują zazwyczaj do badań cieczy spożywczych. Stało się to powodem do podjęcia w Politechnice Poznańskiej prac naukowo badawczych związanych z przetłaczaniem cieczy spożywczych.

Informacje zawarte w dostępnym piśmiennictwie (Biały i Przychodzień, 1982; Charles, 1981; Ratajczak i Ossowski, 1985; Ossowski, 1985; Ratajczak, 2005; Yassine, 2010; Holm, 2007) oraz wyniki własnych badań eksperymentalnych pozwalają na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- wzrost lepkości cieczy powoduje wzrost strat wypełnienia przestrzeni roboczej, co powoduje obniżenie się sprawności objętościowej pompy oraz jej gorszą pracę
- zmiany parametrów reologicznych w dużym stopniu wpływają na charakterystyki energetyczne pompy, zależne między innymi od takich czynników jak:
 - przecieki cieczy z części tłocznej do ssawnej
 - tarcie wewnętrzne cieczy
 - sprawność całkowita pompy zmienia się zależnie od:
 - prędkości obrotowej elementów roboczych
 - oporów przepływu rurociągu
 - parametrów reologicznych cieczy, a w szczególności jej lepkości.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie części wyników realizowanych badań związanych z charakterystykami energetycznymi pomp wyporowych rotacyjnych.

Przedmiot i metodyka badań

Wyniki badań eksperymentalnych dotyczą pompy obrotowo-krzywkowej CPA-5 transportującej syrop ziemniaczany w różnych temperaturach. Poprzez zmiany temperatury zmieniano właściwości reologiczne syropu. Badania zmian właściwości reologicznych syropu w różnych temperaturach przeprowadzono wykorzystując zmodernizowany i przystosowany do współpracy z komputerem reometr rotacyjny o nazwie Rheotest 2. W dostępnej literaturze nie znaleziono prac rozpatrujących właściwości reologiczne syropu ziemniaczanego. Są prace analizujące właściwości reologiczne roztworów skrobi (Broniarz-Press i Kostrzewa, 2012) ale nie zawierają one informacji potrzebnych do realizacji podjętej w prezentowanym opracowaniu tematyki. Dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie własnych badań eksperymentalnych syropu ziemniaczanego.

W celu sporządzenia charakterystyk energetycznych mierzono następujące wielkości:

- wydajność pompy
- ciśnienie na odcinku ssawnym rurociągu
- ciśnienie na odcinku tłocznym rurociągu
- moment na wałku pompy
- prędkość obrotową wału pompy

Pomiary wykonano na stanowisku zaprojektowanym i zainstalowanym w Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności Politechniki Poznańskiej oraz według metod opisanych przez autora we wcześniejszych jego pracach (Ratajczak, 1985; 2005) z uwzględnieniem wskazań normy dotyczącej badań pomp wyporowych (PN-EN 14343:2006) Wyniki opracowano statystycznie posługując się standardowym programem komputerowym Excel.

Na podstawie tych badań sporządzono charakterystyki energetyczne pompy oraz dokonano analizy zależności pomiędzy parametrami reologicznymi syropu ziemniaczanego, a uzyskanymi przebiegami charakterystyk. Aby zapewnić porównywalność charakterystyk tworzy się je zgodnie z ustalonymi regułami i przepisami. W badaniach fabrycznych zadbać należy zwłaszcza o to aby pracowały one w zakresie ich parametrów nominalnych. W eksperymentach naukowych wychodzi się poza te granice, poszerzając pole poznawcze.

W prezentowanej pracy przyjęto 2. podstawowe typy charakterystyk (Jaremienko, 1976; Karassik, 2008):

- charakterystykę przepływu, $H = f(Q)$
- charakterystyki energetyczne, $Q = f(p_t)$, $N_w = f(p_t)$, $\eta = f(p_t)$

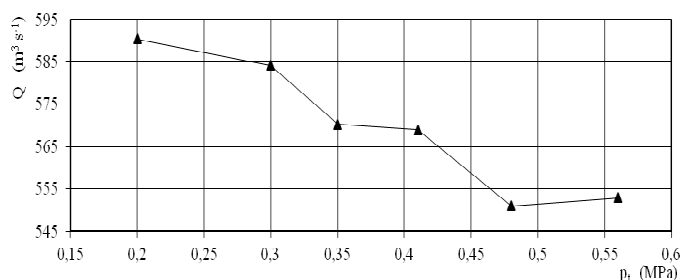
Omówienie wyników badań

Temperaturę syropu ziemniaczanego podczas badań eksperymentalnych zmieniano w zakresie 303–353 (K). W zakresie tym wykazywał on cechy płynu newtonowskiego, a jego lepkość zmieniała się wg. zależności:

$$\mu = 1,58 \cdot 10^{\left(\frac{4652}{T} - 13\right)} \quad (1)$$

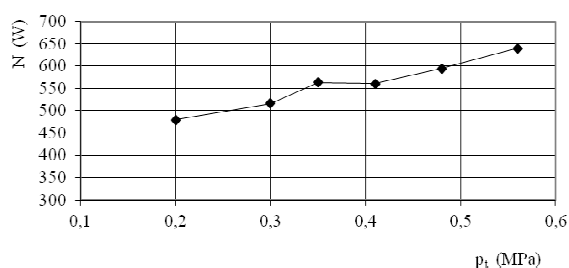
Zależność tą wykorzystano do określania lepkości syropu przetłaczanego pompą podczas badania charakterystyk energetycznych. Wielkością zmienną w tych pomiarach była prędkość obrotowa wałka pompy, a tym samym jej elementów roboczych – rotorów. Zmieniało ją w zakresie $0,83\text{--}3,33\text{s}^{-1}$. Charakterystyki energetyczne sporządzono dla lepkości 10, 20, 33, 41 Pa·s przy wykorzystaniu pełnego zakresu prędkości obrotowych. Dla większych wartości lepkości parametry pracy pompy gwałtownie pogarszały się przy prędkościach obrotowych większych od $1,66\text{ s}^{-1}$. Z tych powodów nie objęto ich analizą w tym opracowaniu. Dla każdej stałej prędkości obrotowej, dławiono przepływ na odcinku tłocznym powodując tym wzrost ciśnienia w układzie pompowym. W każdym cyklu pomiarowym stosowano 7 takich samych nastaw zaworu dławiącego co zapewnia porównywalność uzyskanych wyników.

Na rysunkach 1–3 pokazano przykładowe przebiegi charakterystyk energetycznych pompy dla stałej prędkości obrotowej, przy zmieniającej się skokowo lepkości syropu ziemniaczanego, a na rysunku 4 zależność sprawności od prędkości obrotowej, przy stałym ciśnieniu po stronie tłocznej rurociągu i dla różnych lepkości cieczy.



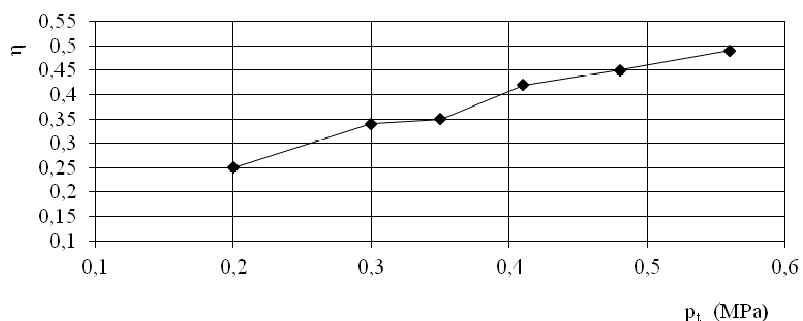
Rysunek 1. Przebieg charakterystyki przepływu $Q=f(p_1)$ dla lepkości syropu 10 Pa·s i prędkości obrotowej $1,6\text{ (s}^{-1}\text{)}$

Figure 1. Course of flow characteristics $Q=f(p_1)$ for viscosity of the syrup of 10 Pa·s and rotational speed $1.6\text{ (s}^{-1}\text{)}$



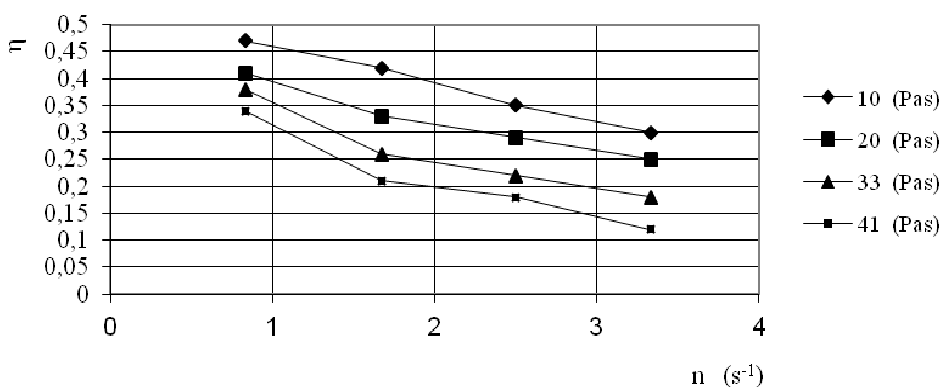
Rysunek 2. Przebieg charakterystyki mocy $N=f(p_1)$ dla lepkości syropu 10 Pa·s i prędkości obrotowej $1,67\text{ (s}^{-1}\text{)}$

Figure 2. Course of characteristics of power $N=f(p_1)$ for viscosity of syrup 10 Pa·s and rotational speed $1.67\text{ (s}^{-1}\text{)}$



Rysunek 3. Przebieg charakterystyki sprawności $\eta=f(p_t)$ dla lepkości syropu 10 Pa·s i prędkości obrotowej $1,67s^{-1}$

Figure 3. Course of characteristics of efficiency $\eta=f(p_t)$ for viscosity of syrup 10 Pa·s and rotational speed $1.67s^{-1}$



Rysunek 4. Przebieg wartości sprawności pompy w funkcji prędkości obrotowej dla stałego poziomu ciśnienia 0,4MPa na odcinku tłocznym i dla różnych lepkości

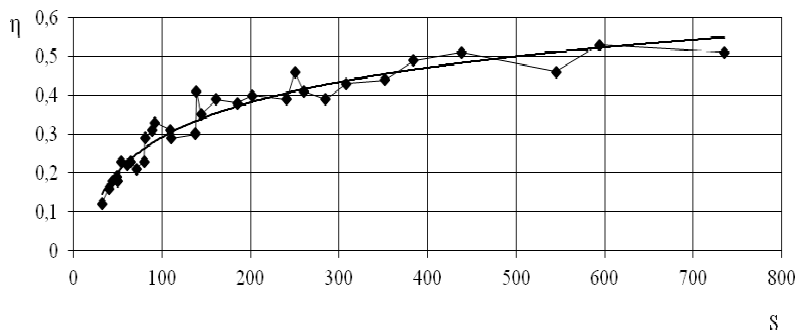
Figure 4. Course of efficiency of value of the pump as the function of rotational speed for constant level of pressure 0.4 Mpa at the pumped section and for various viscosity

Analizując uzyskane podczas badań wyniki podjęto próbę znalezienia związku między parametrami charakterystyk energetycznych. Efektem tych poszukiwań jest stwierdzenie, że sprawność całkowita pompy η jest funkcją, znanej w teorii smarowania hydrodynamicznego łożysk ślizgowych, liczby Sommerfelda S , która w odniesieniu do rozpatrywanej pompy jest bezwymiarowym wskaźnikiem zawierającym kombinację ciśnienia na króćcu tłocznym p_t , lepkości dynamicznej μ oraz prędkości obrotowej rotora pompy

$$S = \frac{p_t}{\mu \cdot n} \quad (2)$$

Przebieg tej zależności na podstawie danych uzyskanych w eksperymencie przedstawiono na rysunku 5, a zapis matematyczny ma postać równania potęgowego:

$$\eta = 1,81 \cdot S^{0,41} \quad (3)$$



Rysunek 5. Przebieg zależności sprawności całkowitej pompy krzywkowej CPA-5 od liczby Sommerfelda

Figure 5. Course of relations between the total efficiency of the lobe pump CPA-5 and Sommerfeld's number

Wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz ich analiza pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wzrost lepkości w analizowanym zakresie tj. 10–41 Pa·s, pogarsza wszystkie charakterystyki energetyczne badanej pompy rotacyjnej
2. Pompa CPA-5 wykazuje niską sprawność całkowitą dla przyjętego w badaniach przedziału wartości lepkości
3. Uzyskana zależność ilościowa stanowi przesłankę do dokładniejszego, niż aktualnie istniejący, opisu ilościowego, zależności pomiędzy parametrami pompy rotacyjnej i przetłaczanym płynem. Istnieje jednak potrzeba dalszych badań w tym zakresie tematycznym w celu stworzenia spójnej teorii pompowania cieczy spożywczych o dużych lepkościach i zmieniających się innych parametrach reologicznych.

Bibliografia

- Biały, J.; Przychodzień, T. (1982). Wpływ wypełnienia pomp wyporowych pracujących w obniżonych temperaturach na ich charakterystyki przepływowe. *Biuletyn VAT*, 2.
- Broniarz-Press L.; Kostrzewa, M. (2012). Właściwości reologiczne roztworów skrobi ziemniaczanej. *Inżynieria i aparatura chemiczna*, 6, 297-298.
- Charles, A. (1981). Reducing energy losses in fluid flow. *Pumps and their applications*, 166, 7305-310.

- Fristan Polska. (2013). *Samozasysające pompy wirowe typu FZ i SF*. Instrukcja obsługi. Pozyskano z: www.instrukcja.pl/storage/Rother/1/1693493718.pdf.
- Holm, R. (2007). Centrifugal Pump Technology in Complex Fluids, *Pump&Systems*, 53.
- Jaremienko, O.S. (1976). *Ispytania nasosov*, Masinostrojenie, Moskva.
- Karassik, I.J. i in. (2008). *Pumps, Handbook*, Mc Grow Hill, USA, ISBN 978-0-07-146044-6.
- Ossowski, G. (1985). *Wpływ lepkości syropu skrobiowego na parametry pracy pompy śrubowej jednowirnikowej typ PSR-32*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, DrOIN106476.
- Ratajczak, W. (1985). *Wpływ lepkości syropu ziemniaczanego na charakterystyki energetyczne pompy obrotowo-krzywkowej CPA-5*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, DrOIN106092.
- Ratajczak, W.; Ossowski, G. (2005). *Transport międzyoperacyjny cieczy w przemyśle cukierniczym*. Materiały Konferencji: Problemy technologii przemysłu cukierniczego, Poznań–Rosnówko, 21-22 maja 2005, 13-22.
- Yassine K.C. i in. (2010). *Experimental Investigation for Centrifugal Slurry Pump Performance*. Proceedings of ICFD 10, Egypt. Pozyskano z: www.yatedo.com/s/Yassine+Khalil.
- Spomasz Zamość S.A. (2013). *Katalog produkowanych pomp spożywczych*. Pozyskano z: www.spomasz.biz.pl
- TOFAMA S.A. (2012). *Katalog pomp śrubowych*. Wersja polsko-angielska. Pozyskano z: www.tofama.eu
- PN-EN 14343:2006. *Tytuł: Obrotowe pompy wporowe*. Badania parametrów odbiorczych.

ENERGY CHARACTERISTICS OF DISPLACEMENT PUMPS TRANSPORTING FOOD LIQUIDS

Abstract. The analysis of operational parameters of displacement pumps depending on rheological parameters of the transported liquid constitutes the subject of the paper. Results of the author's own experimental research of the rotary-lobe pump CPA-5 transporting potato syrup in various temperatures were presented in the paper after indicating a present state of knowledge concerning pumping food liquids of high viscosity. Changes of rheological properties of the syrup were obtained as a result of thermal effects. Energy characteristics were prepared on the basis of these research and the analysis of relations between rheological properties of potato syrup and the obtained course of characteristics was carried out. Deterioration of all characteristics along with the increase of viscosity of the syrup in the conditions accepted for the research was reported. Low efficiency of the pump despite the fact that the producer recommended it in applications for transport of potato syrup is a crucial indication. Moreover, an attempt was made to describe these relations in terms of quantity by presenting a formula positively verified with the experimental research.

Key words: rheology, pumping, food liquids, pumps characteristics, rotary pumps

Adres do korespondencji:

Wojciech Ratajczak, wojciech.ratajczak@put.poznan.pl
Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-695 Poznań