

Henryk Komsta  
Katedra Inżynierii Procesowej, Spożywczej i Ekotechniki  
Politechnika Lubelska

## **BADANIA SPRAWNOŚCI ENERGETYCZNEJ UKŁADU NAPĘDOWEGO HOMOGENIZATORA CIŚNIENIOWEGO**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań kształtowania się strat mocy w układzie napędowym homogenizatora ciśnieniowego. Stwierdzono, że przyjęte z nurnikowych pomp wysokociśnieniowych, pracujących pod stałym obciążeniem, rozwiązania konstrukcyjne węzłów układu napędowego nie zapewniają minimalizacji występujących w nich strat energii.

**Słowa kluczowe:** homogenizator ciśnieniowy, energochłonność, układ napędowy

### **Wprowadzenie**

Projektowanie urządzeń technicznych pod kątem obniżenia ich energochłonności staje się zagadnieniem priorytetowym zarówno dla konstruktorów jak ich przyszłych użytkowników. Dotyczy to także maszyn i urządzeń stosowanych w przemyśle spożywczym i pokrewnych. Do takich urządzeń należy zaliczyć homogenizatory ciśnieniowe, które ze względu na stosowane w nich wysokie wartości ciśnień roboczych zaliczane są do urządzeń bardzo energochłonnych. Aby uzyskać wymagane ciśnienie homogenizacji rzędu 20,0 MPa, przy wydajności roboczej 40,0 m<sup>3</sup>/godz. we współczesnych homogenizatorach ciśnieniowych instalowane są silniki elektryczne o mocy rzędu 300 kW. Jednocześnie szacuje się, że tylko (2-3)% pobieranej przez homogenizator z sieci energii wykorzystywane jest na pracę rozdrabniania cząstek fazy rozproszonej. Pozostała część energii zużywana jest m.in. na pokonanie oporów tarcia przetłaczanej przez wąską szczelinę cieczy (przejawem tego tarcia jest m.in. wzrost temperatury homogenizowanego czynnika) oraz na pokonanie oporów tarcia w mechanizmach układu napędowego.

Większość prowadzonych badań homogenizacji ciśnieniowej koncentrowała się przede wszystkim na określeniu wpływu podstawowych parametrów eksploatacyjnych

homogenizatora, takich jak ciśnienie homogenizacji i temperatura homogenizowanego czynnika na efektywność realizowanego procesu homogenizacji – jednoczesnego rozdrabniania cząstek fazy rozproszonej i ujednoludzenia składu obrabianego czynnika [Brennan 1970; Coupland i in. 2001; Desrumaux i in. 2002; Flourey i in. 2000; Walstra 1999]. Zagadnienia związane z energetycznymi aspektami pracy homogenizatora ciśnieniowego nie były dotychczas poddawane głębszej analizie.

### **Cel pracy**

Celem pracy była próba określenia strat energii w węzłach konstrukcyjnych układu napędowego homogenizatora ciśnieniowego w zależności od ciśnienia homogenizacji  $P$ , długości szczeliny homogenizującej  $L$  i procentowego udziału cząstek fazy wewnętrznej homogenizowanego układu ciekłego  $S$ .

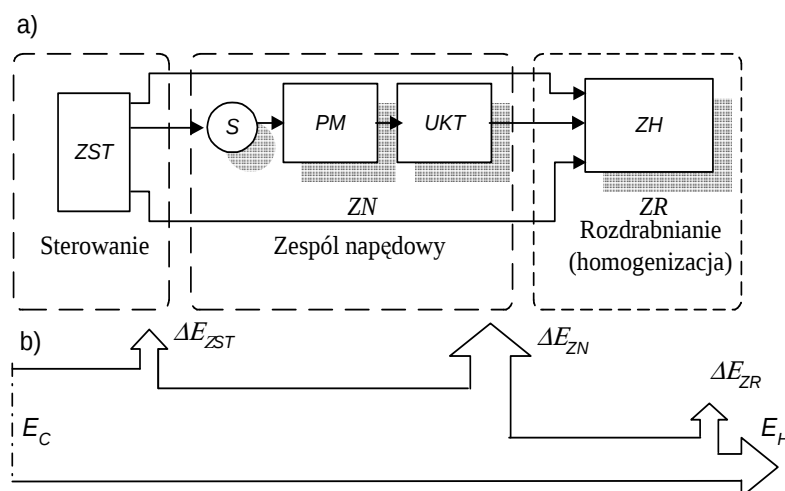
### **Energetyczne aspekty pracy homogenizatora ciśnieniowego**

Stosowane w przemyśle homogenizatory ciśnieniowe można traktować jako urządzenia składające się z pompy wysokociśnieniowej (układ napędowy) i głowicy homogenizującej (układ rozdrabniający). Zgodnie z [Flizikowski 1990; Kravets 1997; Kukiełka 2002; Leszek 1997; Lewicki P.P. i in. 1999] w układach technicznych przeznaczonych do rozdrabniania mechanicznego, a do takich zalicza się np. homogenizatory ciśnieniowe, można wyróżnić następujące zespoły konstrukcyjne (rys. 1a):

- Zespół sterowania i kontroli  $ZST$  (układ regulacji ciśnienia homogenizacji  $P$  i pomiaru temperatury  $T$ )
- Zespół napędowy  $ZN$  (silnik  $S$ , przekładnia mechaniczna  $PM$ , układ korbowo-tłokowy  $UKT$ , zawory ssąco-tłoczące  $Z$ )
- Zespół rozdrabniający  $ZR$  (głowica homogenizująca  $GH$  z zaworem homogenizującym  $ZH$ )
- Zespołu pomocniczego  $ZP$  (układ chłodzący  $CH$ )

Schemat przepływu strumienia energii pobieranej z sieci przez homogenizator ciśnieniowy przedstawiono na rysunku 1b.

W zespołach napędowym  $ZN$  i rozdrabniającym  $ZR$ , tworzących układ wykonawczy homogenizatora, występują największe straty energii oznaczone odpowiednio (rys. 1b):  $\Delta E_{ZN}$  i  $\Delta E_{ZR}$ .



Rys. 1. Schemat blokowy układu technicznego homogenizatora ciśnieniowego: a – schemat blokowy, b – rozkład przepływającego przez zespoły konstrukcyjne homogenizatora strumienia energii

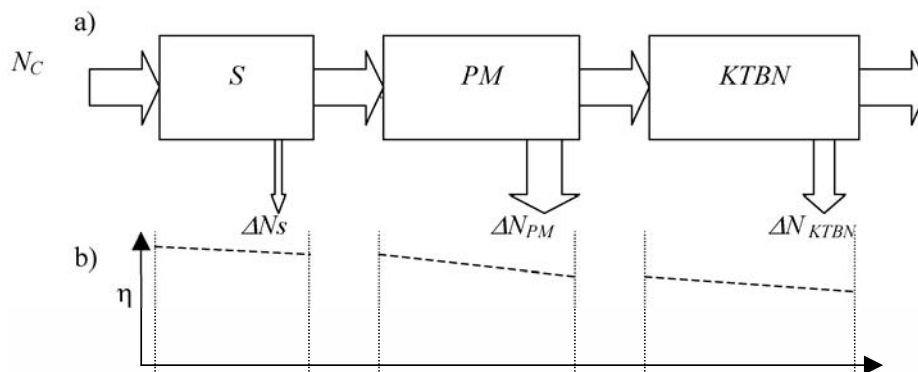
Fig. 1. Block diagram of pressure homogenizer's technical system: a – block diagram, b – distribution of energy flux in homogenizer's structure units

Straty energii w zespole sterowania ZST zależą przede wszystkim od przyjętego sposobu regulacji ciśnienia (ręcznego lub hydraulicznego) i tak jak straty energii w układzie pomocniczym ZP (np. chłodzenie nurników) można przyjąć jako pomijalnie małe.

## Obiekt badań

Obiektem badań był układ napędowy (silnik elektryczny S i przekładnia mechaniczna PM (pasowa)) zespołu napędowego ZN homogenizatora ciśnieniowego typu CHO3 produkcji FMiUPSpół. „SPOMASZ” Bełżyce o następujących parametrach techniczno-eksploatacyjnych: wydajność nominalna 0,3 m<sup>3</sup>/h przy roboczym ciśnieniu homogenizacji 16,0 MPa; maksymalne ciśnienie homogenizacji 22,0 MPa; maksymalna temperatura homogenizowanego produktu 85°C; nominalna moc zainstalowanego silnika elektrycznego  $N = 3,5$  kW.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy przepływu strumienia energii przez zespół napędowy ZN badanego homogenizatora ciśnieniowego.



Rys. 2. a) Schemat blokowy przepływu strumienia energii przez zespół napędowy homogenizatora ciśnieniowego: *S* – silnik elektryczny, *PM* – przekładnia mechaniczna (pasowa), *KTBN* – wał korbowo-tłokowy i blok nurnikowy, b) schemat zmian sprawności na poszczególnych ogniwach zespołu napędowego w zależności od zadanego ciśnienia homogenizacji  $\eta = f(P)$ .

Fig. 2. a) Block diagram of the flow of energy flux in pressure homogenizer's power unit: *S* – electric motor, *PM* – belt transmission, *KTBN* – crank/piston shaft and plunger block, b) diagram of changes in efficiency in individual links in the power unit.

W czasie pracy homogenizator ciśnieniowy pobiera z sieci elektrycznej moc czynną  $N_C$ , która przepływając przez poszczególne zespoły konstrukcyjne zespołu napędowego ulega przekształceniom jednocześnie generując następujące straty:

#### Straty mocy w silniku elektrycznym – $\Delta N_S$

Moc czynna  $N_C$  pobierana z sieci przez silnik elektryczny jest zamieniana na energię mechaniczną (kinetyczną) na wale silnika  $E_S$  oraz tracona na pokonanie oporów elektrycznych i mechanicznych silnika  $\Delta E_S$ . Straty mocy w silniku określa zależność postaci:

$$\Delta N_S = N_C - N_S \quad (1)$$

Pomiaru mocy czynnej  $N_C$  dokonano miernikiem MPS7-07 produkcji OBR Metrologii Elektrycznej METROL w Zielonej Górze. Miernik MPS7 jest przeznaczony do pomiaru i wskazań parametrów sieci energetycznej 1-fazowej lub 3-fazowej, 3-przewodowej. Pomiar sygnałów doprowadzonych z obwodów sieci energetycznej jest realizowany w przyrządzie metodą próbkowania z możliwością przesyłania wyników interfejsem RS-485 przez konwerter ADAM 4520 firmy Advantech do komputera klasy PC.

**Straty mocy w przekładni mechanicznej (pasowej) –  $\Delta N_{PM}$**

Do czynników obniżających sprawność przekładni pasowej z pasami klinowymi można m.in. zaliczyć [Dudziak 1997; Popko 1979]:

- straty występujące w rezultacie zaciskania się pasa w rowkach kół,
- straty tarcia na skutek poślizgów pasa na kołach
- straty tarcia wewnętrznego występującego w pasie pod wpływem obciążenia użytecznego i pod wpływem zaginania się pasa na kołach
- straty tarcia elementów tocznych (łożyskowania) przekładni
- straty aerodynamiczne wywołane ruchem pasa i kół pasowych

Straty mocy w przekładni pasowej  $\Delta N_{PM}$  można określić jako różnicę mocy na wale silnika  $N_S$  (na kole czynnym) i mocy na wale korbowym  $N_{WK}$  (na kole biernym).

$$\Delta N_{PM} = N_S - N_{WK} \quad (2)$$

W celu określenia mocy na wale silnika  $N_S$  i na wale korbowym  $N_{WK}$  przeprowadzono pomiary odpowiadających im momentów i prędkości obrotowych. Pomiar wielkości momentu obrotowego  $M_S$  i  $M_{WK}$  przeprowadzono z wykorzystaniem momentomierzy indukcyjnych Mi10 i Mi20. Momentomierze te były zaistalowane na wale czynnym i biernym przekładni pasowej układu napędowego badanego homogenizatora ciśnieniowego.

Pomiaru prędkości obrotowych  $n_1$  i  $n_2$  kół przekładni pasowej dokonano stosując układ pomiarowy wykorzystujący zjawisko Halla. Na wale czynnym i wale biernym przekładni pasowej zamocowano tarcze z naciętymi na obwodzie rowkami. Do obudowy łożysk przekładni pasowej homogenizatora ciśnieniowego na specjalnych ramionach zamocowano dwa czujniki fotoelektryczne (po jednym do każdego koła).

**Straty mocy w układzie korbowo-tłokowym i bloku nurnikowym –  $\Delta N_{KTBN}$**

Straty mocy  $\Delta N_{KTBN}$  w układzie korbowo-tłokowym oraz bloku nurnikowym pompy są spowodowane głównie oporami tarcia mechanizmów wykonujących ruch obrotowy i ruch posuwisto-zwrotny oraz oporami tarcia przetłaczanej cieczy przez zawory ssąco-tłoczące oraz kanały przepływowe bloku nurnikowego. Można je oszacować z zależności:

$$\Delta N_{KTBN} = N_{WK} - N_K \quad (3)$$

gdzie:

$N_K$  – moc strumienia cieczy przed szczeliną homogenizującą.

Zgodnie z celem pracy i przyjętym planem badań doświadczalnych (plan badań rotacyjno-uniformalny) określono wpływ następujących wielkości wejściowych ( $X_i$ ): ciśnienie homogenizacji  $P$ , stężenie cząstek fazy rozproszonej  $S$  i długość szczeliny zaworu homogenizującego  $L$  na wielkości zależne ( $Y_i$ ) takie jak: strata mocy w silniku elektrycznym homogenizatora  $\Delta N_s$ , strata mocy w przekładni pasowej homogenizatora  $\Delta N_{PM}$ ,

W badaniach wykorzystano komplet płaskich zaworów homogenizujących różniących się długością szczeliny homogenizującej.

Stosowano różne (określone planem eksperymentu) wartości wielkości wejściowych  $X_i$  [Godziszewski i in. 1987; Polański 1984]. W tabeli 1 przedstawiono przyjęte w badaniach zakresy wartości badanych wielkości wejściowych  $X_i$ .

Tabela 1. Zakresy wartości wielkości wejściowych  $X_i$

Table 1. Ranges of input  $X_i$

| Wielkość wejściowa $X_i$ | Oznaczenie czynnika | Zakres wartości            | Dokładność pomiaru |
|--------------------------|---------------------|----------------------------|--------------------|
| $X_1$                    | $L$ [m]             | $(2,5-9,5) \times 10^{-3}$ | $10^{-4}$          |
| $X_2$                    | $P$ [MPa]           | 0,1–20,0                   | 0,1                |
| $X_3$                    | $S$ [kg/kg]         | 0,000–0,180                | 0,001              |

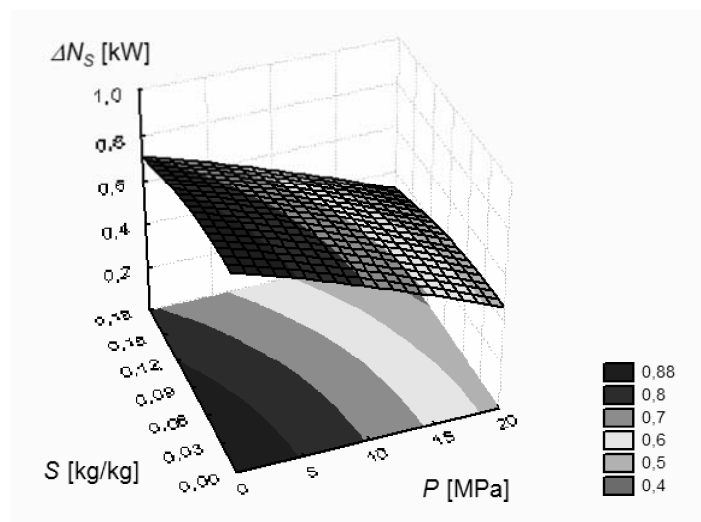
Jako medium poddawane procesowi homogenizacji ciśnieniowej wykorzystano emulsję olej/woda o temperaturze 36°C.

Uzyskane wyniki badań po statystycznym opracowaniu umożliwiły określenie współczynników równań regresji, dzięki czemu określono równania modeli matematycznych dla wyników doświadczeń na poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ .

## Wyniki badań

### Straty mocy w silniku elektrycznym

Na podstawie uzyskanych wyników badań, stwierdzono, że na wielkość strat mocy w silniku elektrycznym  $\Delta N_s$  największy wpływ ma ciśnienie homogenizacji  $P$  oraz w znacznie mniejszym stopniu stężenie cząstek fazy rozproszonej  $S$ . Podane parametry wykazują ujemny wpływ na straty  $\Delta N_s$ . Wpływ długości szczeliny homogenizującej  $L$  jest statystycznie nieistotny. Na rysunku 3. przedstawiono zależność wielkości straty mocy  $\Delta N_s$  od ciśnienia homogenizacji  $P$  i stężenia cząstek fazy rozproszonej  $S$  dla fabrycznego płaskiego zaworu o długości szczeliny homogenizującej  $L = 6 \times 10^{-3}$  m.



Rys. 3. Zależność wielkości straty mocy w silniku elektrycznym  $\Delta N_s$  od ciśnienia homogenizacji  $P$  i stężenia cząstek fazy rozproszonej  $S$  dla płaskiego zaworu fabrycznego o długości szczeliny homogenizującej  $L=6 \times 10^{-3}$  m

Fig. 3. The dependence of the amount of power losses  $\Delta N_s$  from homogenization's pressure  $P$  and molecular concentration of disperse phase  $S$  for flat-seated valve with the length of homogenizing slit  $L=6 \times 10^{-3}$  m

Po odrzuceniu nieistotnych współczynników równania regresji, model matematyczny opisujący zależność strat energii w silniku elektrycznym homogenizatora ciśnieniowego od badanych wielkości wejściowych (w jednostkach fizycznych), przedstawia się następująco:

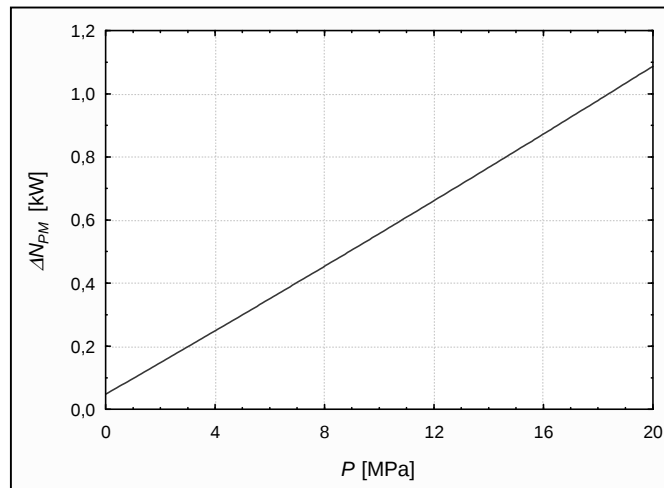
$$\Delta N_{S \text{ model}} = 0,6355 - 0,123 P - 0,046 S; \quad R^2 = 0,8386; \quad (4)$$

#### Zależność straty mocy w przekładni mechanicznej $\Delta N_{PM}$ od czynników wejściowych

Po odrzuceniu nieistotnych współczynników równania regresji model matematyczny opisujący zależność straty mocy w przekładni mechanicznej  $\Delta N_{PM}$  od badanych wielkości wejściowych (w jednostkach fizycznych), ma postać:

$$\Delta N_{PM \text{ model}} = 0,5589 + 0,3116 P + 0,0306 L \cdot S; \quad R^2 = 0,9732; \quad (5)$$

Adekwatność równań (4) i (5) opisujących eksperyment dla wielkości wejściowych  $X_i$  w zakresie  $L = (2,5-9,5) \times 10^{-3}$  m,  $P = (0,1-20,0)$  MPa i  $S = (0,00-0,18)$  kg/kg sprawdzono stosując test Fishera [Polański 1984].



Rys. 4. Zależność wielkości straty mocy  $\Delta N_{PM}$  od ciśnienia homogenizacji  $P$

Fig. 4. The dependence of the amount of power loss  $\Delta N_{PM}$  from homogenization's pressure

Jak wynika z wykresu na rysunku 4 wielkość straty mocy  $\Delta N_{PM}$  w badanej przekładni mechanicznej wzrasta proporcjonalnie wraz ze wzrostem ciśnienia homogenizacji  $P$ . Związane jest to ze wzrostem, pojawiających się pod wpływem zwiększającego się obciążenia (ciśnienia  $P$ ), różnego rodzaju strat energii w przekładni pasowej. Są to m.in.: straty występujące na skutek zaciskania się pasa w rowkach kół, straty wynikające ze wzrostu tarcia na skutek poślizgów pasa na kołach itp.

## Wnioski

1. Uzyskane na tym etapie badań wyniki wykazują, że wielkości strat energii w węzłach konstrukcyjnych układu napędowego homogenizatora ciśnieniowego zależą przede wszystkim od wielkości determinujących stopień obciążenia urządzenia takich jak ciśnienie homogenizacji i stężenie homogenizowanego układu.
2. Wpływ ten nie jest jednoznaczny. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że wzrost ciśnienia homogenizacji  $P$  powoduje zmniejszenie

strat mocy  $\Delta N_s$  w silniku elektrycznym przy jednoczesnym wzroście strat mocy w przekładni pasowej  $\Delta N_{PM}$ .

3. Badania wykazały istnienie zależności pomiędzy stężeniem fazy rozproszonej  $S$  homogenizowanego czynnika a wartością ciśnienia homogenizacji  $P$  (obciążenie homogenizatora) zapewniającą uzyskanie wymaganego efektu homogenizacji przy minimalnych nakładach energetycznych. I tak dla badanej emulsji olej/woda i płaskich zaworów homogenizujących o długości szczelin homogenizujących  $L = (6-9,5) \times 10^{-3} \text{m}$  (spotykanej w homogenizatorach ciśnieniowych o wydajności objętościowej rzędu  $(0,3-0,5) \text{m}^3/\text{godz.}$ ) oraz stężeniach fazy rozproszonej  $S \leq 0,14 \text{kg/kg}$  wymagany efekt homogenizacji uzyskano przy ciśnieniach nie przekraczających wartości  $P = 15 \text{MPa}$ , zaś w przypadku homogenizacji emulsji o stężeniu większym od  $S = 0,14 \text{kg/kg}$  minimalna wartość ciśnienia wynosi  $P = 18 \text{MPa}$ . Przekłada się to na prawie 14% wzrost zużywanej przez homogenizator energii.
4. W celu ograniczenia energochłonności procesu homogenizacji należy rozważyć możliwość konstruowania homogenizatorów ciśnieniowe przeznaczonych do obróbki medium o określonych właściwościach fizykochemicznych lub konstruowanie przekładni mechanicznych o stałej charakterystyce lub zapewniającej stałe optymalne obciążenie silnika elektrycznego homogenizatora ciśnieniowego.

## **Bibliografia**

- Brennan J.G. 1970. Emulsions in food technology. *Proc.-Bioch.* 5 (7) 33-37.
- Coupland J.N., McClements D.J. 2001. Droplet size determination in food emulsions: Comparison of ultrasonic and light scattering methods. *J.Food Eng.*, 50, 2.
- Desrumaux A., Marchand J. 2002. Ultra-high-pressure homogenization of emulsions. *In: J.Food.Sc.a.Techn.*, 37.
- Dudziak M. 1997. *Przekładnie cięgnowe*. PWN, Warszawa.
- Flizikowski J. 1990. *Badania i podstawy konstrukcyjne wielotarczowych rozdrabniaczy nasion*, Rozprawy nr 42. Wydawnictwo Uczelniane ATR w Bydgoszczy. Bydgoszcz.
- Fluory J., Desrumaux A., Lardieres J. 2000. Effect of high-pressure homogenization on droplet size distribution and rheological properties of model oil-in-water emulsions. *Innovative Food Sc.&Eng. Techn.*, 1, 127-134.

Godziszewski J., Mania R., Pampuch R. 1987. Zasady planowania doświadczeń i oracowania wyników pomiarów. Wyd. AGH. Kraków.

Kravets B.K. 1997. Emulsifying equipment. Trends in Food Sc.&Techn. 8, 1

Kukielka L. 2002. Podstawy badań inżynierskich. Wydawnictwa PWN, Warszawa.

Leszek W. 1997. Badania empiryczne. Wyd. I.Te.E. Radom.

Lewicki P.P. red. 1999. Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego. WNT Warszawa.

Polański Z. 1984. Planowanie doświadczeń w technice. PWN. Warszawa.

Popko H. 1979. Przekładnie pasowe. Wydawnictwo Uczelniane PL. Lublin.

Walstra P. 1999. Food emulsions: principles, practice, and techniques. Trends in Food Sc.&Techn., 10, 6-7.

## **THE INVESTIGATIONS ON WATT-HOUR EFFICIENCY OF PRESSURE HOMOGENIZER'S POWER TRANSMISSION SYSTEM**

### **Summary**

The paper presents the results of the research on forming of power loss in pressure homogenizer's power transmission system. It has been established that the structure of power transmission system used in pressure homogenizers, which is based on solutions used in a typical high-pressure plunger pump (working with steady load), does not ensure the minimization of power losses.

**Key words:** pressure homogenizer, energy-efficient, power transmission system