SAPROPEĻA PLŪSMAS REOLOĢISKAIS MODELIS
RHEOLOGICAL MODEL OF SAPROPEL FLOW

A. Kaķītis
LLU Lauksaimniecības mašīnu mehānikas zinātniskā laboratorija
Research laboratory of Mechanics, LLU

Abstract. The most important problem for sapropel extraction by means of pumping systems is the reduction of energy costs for the transportation of pure humidity sapropel in pipelines. The main parameters which create energy losses in the flow are: plastic viscosity μ_p and boundary shearing stress τ_0. The article presents results of mathematical modelling of pure sapropel flow. An equation is worked out which describes changes of shear stress in dependance of shear rate in the pure sapropel flow. The equation can be used for modelling different non-Newtonian plastic fluids with non linear flow curves. The equation gives good accordance between theory and results of the experiment. Coefficient of determination reaches value R^2=0.92-0.98
Key words: sapropel, sludge, non-Newtonian fluid, viscosity, thixotropy.

1. Ievads

Galvenās sapropeļa atradnes Latvijā ir aizaugušos (eitrofos) ezeros. Šajā gadījumā sapropeļa ieguve vienlaicīgi ir ezera restaurācijas pasākums, kam jāuzlabo vides kvalitāte. Ieguves projektēšana veicama individuāli - atbilstoši katra ezera īpatnībām un vides aizsardzības noteikumu prasībām. Sapropeļa reoloģisko un fizikālo īpašību izpēte un tā iegulu (atradņu) raksturojums ļauj pielietot noteiktus principus, kuri izmantojami ieguves iekārtu projektēšanā un izvēlē. Lai iegūtu maksimālu ekonomisko efektu, sapropeļa ieguves iekārtām jānodrošina minimāls enerģijas patēriņš masas ieguvē un tālākā izmantošanā. Viens no energoietilpīgākiem iegūtā sapropeļa pirmapstrādes procesiem ir tā atūdeņošana. Sapropeļa atūdeņošanas pakāpe ir atkarīga no tā tālākās izmantošanas un daudzos gadījumos nav nepieciešama, ja masa tiek iegūta dabīgā mitrumā nesajaucot ar papildus ūdens daudzumu. Organisko sapropeļu dabīgais mitrums iegulā svārstās no 75-95 % atkarībā no organiskās vielas satura masā.

Dabīga mitruma sapropeļa ieguvei var izmantot gan konteineru metodi, gan sūkņus. Vairākas šādas iekārtas ir izstrādātas LLU Lauksaimniecības mašīnu mehānikas zinātniskajā laboratorijā. Sapropeļa transportēšanai no iegulas uz krātuvi ezera krastā ērti izmantot cauruļvadus, taču dabīga mitruma sapropeļa plūsma rada lielus berzes zudumus pa cauruļvada garumu padarot sistēmu ekonomiski neizdevīgu. Berzes zudumus iespējams ievērojami samazināt veidojot mazviskozu robežslāni uz cauruļvada iekšējās sieniņas (J. Daniel, 1993). Lai varētu veikt šādu iekārtu aprēķinus, nepieciešams zināt dabīga mitruma sapropeļa reoloģiskās īpašības un tā plūsmas likumsakarības.

Galvenie faktori, kas nosaka enerģijas zudumus sapropeļa deformācijā, ir masas plastiskā viskozitāte μ_p un bīdes robežspriegums τ_0. Šīs īpašības un plūsmas likumsakarības ir labi izpētītas sapropeļa-ūdens šķīdumiem ar mitruma saturu 96-99 % (Методические указания, 1981). Tas izskaidrojams ar to, ka sapropeļa ieguvei plaši tika lietoti zemessūcēji, kuru normālas darbības nodrošināšanai dabīga mitruma sapropelis tika atšķaidīts ar ūdeni attiecībā 1:4 līdz 1:25, atkarībā no organiskās vielas satura masā. Zemessūcēju izmantošana sapropeļa ieguvei pašreiz nav ekonomiski izdevīga, jo nepieciešami lieli nosēdlauki sapropeļa atūdeņošanai, kuru izbūve ir dārga.

Atšķaidīta sapropeļa plūsmu aprēķiniem par pamatu tiek ņemts Bingama vienādojums, kurš nodrošina pietiekamu precizitāti cauruļvadu un iekārtu projektēšanai (Методические указания, 1981):

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{du}{dy}, \tag{1}$$

kur τ_0 - bīdes robežspriegums, Pa;

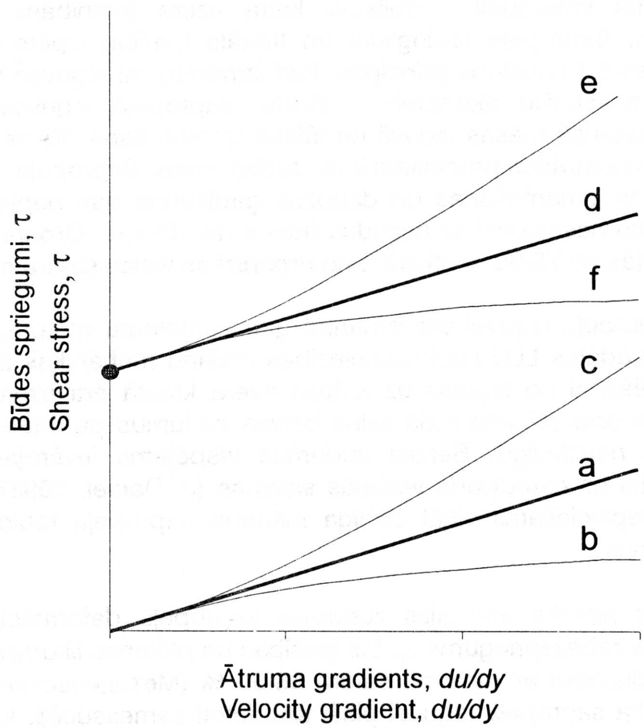
μ_p - plastiskā viskozitāte, Pa.s;

du/dy - ātruma gradients, s^{-1}.

Bingama vienādojums apraksta tādu neņūtona šķidrumu deformāciju, kuriem nepiemīt tiksotropija, t.i., to plastiskā viskozitāte un bīdes robežspriegums nemainās atkarībā no deformācijas laika.

2. Sapropeļa reoloģiskais modelis

Dabīga mitruma sapropeļa reoloģisko īpašību pētījumi parādīja, ka tā plastiskā viskozitāte μ_p un bīdes robežspriegums τ_0 ir atkarīgi no deformācijas laika un ātruma gradienta *du/dy* (A. Kaķītis, 1996). Deformācijas sākumā, kad materiāla struktūra nav izjaukta, tas izrāda lielāku pretestību deformācijai. Dabīga mitruma sapropelis pēc savas uzbūves atbilst gelam. Deformācijas rezultātā gela struktūra tiek izjaukta un tas pārvēršas solā. Notiek atgriezeniska izotermiska pāreja, kura izpaužas kā tiksotropija (Fizikālā un koloidālā ķīmija, 1990). Tā pastiprinās, palielinoties sausnas saturam masā (A. Kaķītis, 1997). Pēc deformācijas noņemšanas struktūra pamazām atjaunojas. Tā rezultātā dabīga mitruma sapropeļa tecēšanas līkne ir nelineāra (1. att., līkne *f*). Pētījumu mērķis - atrast dabīga mitruma sapropeļa tecēšanas līknei atbilstošu vienādojumu un tā koeficientus.



1. att. Tecēšanas līknes dažādiem šķidrumiem:
a - Ņūtona (īstajiem) šķidrumiem; b, c - Ostvalda de Veila; d - Bingama plastiskiem šķidrumiem; e, f - tiksotropiem un reopektiskiem šķidrumiem.
Fig. 1. Flow curves for different fluids:
a - Newtonian; b, c - Ostwald de Waele; d - Bingham plastic fluids; e, f - nonlinear plastics.

Neņūtona šķidrumu plūsmu attēlošanai izstrādāti daudzi empīriski vienādojumi. Pseidoplastisko šķidrumu (polimēru šķīdumu) kustību (līknes *b, c*) attēlo Ostvalda de Veila (*Ostwald de Waele*) empīrisks vienādojums (J. Ferguson, 1991):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n , \tag{2}$$

kur *K* - konsistences rādītājs;
n - nelinearitātes koeficients.

Plastiskie (pastveida) šķidrumi un suspensijas, pie kuriem pieder arī dabīga mitruma sapropelis, sāk tecēt tikai tad, ja tiek pārsniegta bīdes robežsprieguma vērtība τ_0. Ideāla plastiska šķidruma tecēšanu apraksta Bingama vienādojums (1) (1. att. līkne *d*).

Taču praksē lielākoties sastopami plastiskie šķidrumi, kuru tecēšanas līknes ir nelineāras (1. att. līknes *e, f*.). Lai aprakstītu šādu šķidrumu kustību, izstrādāti daudzi empīriski vienādojumi. Plašāk pazīstami šādi vienādojumi (J. Ferguson, 1991; Ю. Мачихин, 1981):

Balkli-Heršela (*Bulkley-Herschel*): $$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n , \tag{3}$$

Kesona (*Casson*): $$\tau^{1/2} = \tau_K^{1/2} + \left(\mu_K \cdot \dot{\gamma}\right)^{1/2} , \tag{4}$$

Šulmana (*Шульман*) $$\tau^m = \tau_0^m + K \cdot \dot{\gamma}^n , \tag{5}$$

Krossa (*Cross*) $$\mu = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{\left[1 + \left(k\dot{\gamma}\right)^n\right]} , \tag{6}$$

kur $\dot{\gamma}$ - ātruma gradients;
μ_K - plastiskā viskozitāte pēc Kesona;
τ_K - bīdes robežspriegums pēc Kesona;
μ_0, μ_∞ - vislielākā un vismazākā plastiskā viskozitāte;
m, n - nelinearitātes koeficienti.

Vienādojumos (2), (3) un (5) plūsmas nelineārās parādības tiek attēlotas, ņemot par pamatu Ņūtona vai Bingama vienādojumus un nelinearizējot tos ar dažādu kāpinātāju palīdzību. Šajos vienādojumos tiek pieņemts, ka *n* ir konstante, kuras vērtība ir noteikta katram materiālam. Tā kā τ un $\dot{\gamma}$ mērvienības ir noteiktas, tad iegūstam, ka *K* mērvienībai jāmainās pārejot no viena materiāla uz citu.

Vienādojuma (4) visi locekļi satur vienādu kāpes rādītāju un tas ir korekts attiecībā uz mērvienībām. Taču eksperimenti ar dabīga mitruma sapropeli parādīja, ka vienādojums (4) tikai ļoti aptuveni apraksta tā plūstamību. Izmainot visiem locekļiem pakāpes rādītāja vērtību, iespējams panākt labāku sakritību ar eksperimenta datiem, bet iegūtā vienādojuma tālāka izmantošana plūsmu modelēšanā ir ierobežota, jo tā integrēšana noved pie sarežģītām izteiksmēm un neļauj aprēķināt plūsmas ātrumu un caurplūdi.

Līdzīga situācija ir ar vienādojumu (6). Šis vienādojums satur parametrus μ_∞ un μ_0, kur μ_0 ir masas plastiskā viskozitāte šķidrumam ar neizjauktu struktūru (deformācijas sākumā). Veicot sapropeļa reoloģisko īpašību pētījumus tika konstatēts, ka precīza šī parametra noteikšana ir apgrūtināta, jo deformācijas sākumā tas izmainās ļoti strauji (A. Kaķītis, 1996.).

Analizējot eksperimentāli iegūto dažāda mitruma sapropeļa plūstamības līkņu raksturu un salīdzinot tās ar dažādiem plastisko šķidrumu tecēšanas modeļiem, tika iegūts vienādojums, kurš labi apraksta dabīga mitruma sapropeļa tecēšanu un ir pietiekoši vienkāršs.

Vienādojums iegūts, pārveidojot Bingama vienādojumu (1). Lai izvairītos no mērvienību neatbilstības, pārveidojam vienādojumu (1) bezdimensionālā formā dalot abas tā puses ar τ_0:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 + \frac{\mu_p}{\tau_0}\frac{du}{dy}. \quad (7)$$

Lai ievērtētu plastiskās viskozitātes izmaiņu atkarībā no ātruma gradienta un bīdes robežsprieguma izmaiņu, kāpinām vienādojuma labās puses mainīgo saskaitāmo pakāpē n un reizinām ar koeficientu k:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 + k\left(\frac{\mu_p}{\tau_0}\frac{du}{dy}\right)^n. \quad (8)$$

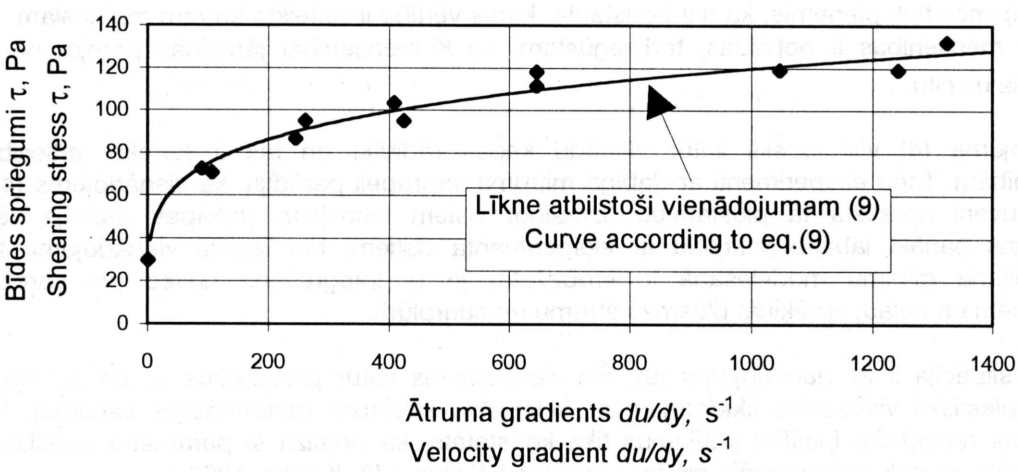
Izsakot spriegumus τ, iegūstam dabīga mitruma sapropeļa plūsmas reoloģisko modeli:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 + k\left(\frac{\mu_p}{\tau_0}\frac{du}{dy}\right)^n\right). \quad (9)$$

Iegūtais vienādojums satur bezdimensionālus koeficientus k un n, kuru vērtības mainās atkarībā no sapropeļa sausnas un organiskās vielas satura.

Lai atrastu koeficientu k un n vērtības un noteiktu vienādojuma 9 atbilstību reālai sapropeļa plūsmai, tika veikta sērija dažāda mitruma sapropeļu reoloģisko īpašību mērījumu. Sapropeļa paraugu reoloģiskās īpašības noteiktas, izmantojot konusa-plāksnes tipa reometru. Tika noteikta masas plastiskā viskozitāte un deformācijas robežspriegums, kā arī uzņemta deformācijas spriegumu izmaiņas līkne atkarībā no plūsmas ātruma gradienta. Paraugiem izmantots dabīga mitruma sapropelis ar organiskās vielas saturu sausnā - 62 %, mitruma saturs - 90-96 %, temperatūra - 18°C. Eksperimentu metodes un materiāli analizēti rakstā "Sapropeļa reoloģiskās īpašības" (A. Kaķītis, 1996), tāpēc sīkāk tos šeit neaplūkosim.

Izmantojot eksperimentāli iegūtās sapropeļa tecēšanas līknes, tika noteikti koeficienti k un n. Pētījuma rezultāti parādīja, ka, izmantojot vienādojumu (9), iespējams panākt labu sakritību ar eksperimenta rezultātiem. Dažāda mitruma sapropeļiem determinācijas koeficients svārstījās robežās R^2=0.92-0.98. Plūstamības līkne atbilstoši vienādojumam (9) sapropelim ar relatīvo mitrumu W=92 % un organiskās vielas saturu sausnā 62 % parādīta 2. att.



2. att. Dinamisko bīdes spriegumu izmaiņa atkarībā no ātruma gradienta
Fig. 2. Changes of dynamic stress depending on velocity gradient.

Iegūtais vienādojums, kurš izsaka bīdes spriegumu izmaiņu atkarībā no ātruma gradienta, satur koeficientus k=2.5 un n=0.28, plastiskās viskozitātes μ_p vērtība atbilst šķidrumam ar pilnīgi izjauktu struktūru, un tā ir plastiskās viskozitātes vismazākā vērtība:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 + 2.5 \cdot \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy} \right)^{0,28} \right). \tag{10}$$

Determinācijas koeficients R^2=0.98.

Lai vienādojumu (9) varētu izmantot plūsmu aprēķināšanai cauruļvados, no tā tika izteikts ātruma gradients un veikta iegūtā diferenciālvienādojuma integrēšana:

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau_0}{\sqrt[n]{k} \cdot \mu_p} \sqrt[n]{\frac{\tau}{\tau_0} - 1}\,. \tag{11}$$

Apaļā cauruļvadā bīdes spriegumus masā nosaka pēc formulas (pieņemot, ka nenotiek masas izslīdēšana pa caurules sieniņu) (M. Рейнер, 1963):

$$\tau = \frac{r \cdot \Delta p}{2l}, \tag{12}$$

kur r - attālums no cauruļvada centra līdz deformējamajam masas slānim,
Δp - spiediena kritums uz cauruļvada posmu, l - posma garums.

Ievietojot vienādojumu (12) vienādojumā (11) un apzīmējot attālumu starp šķidruma elementārslānīšiem kā cauruļvada rādiusa izmaiņu, $dy=dr$ iegūstam:

$$du = \frac{\tau_0}{\sqrt[n]{k} \cdot \mu_p} \sqrt[n]{\frac{r \cdot \Delta p}{2l \cdot \tau_0} - 1} \cdot dr\,. \tag{13}$$

Lai integrētu vienādojumu (13), tā vienkāršošanas labad apzīmējam konstantos lielumus $\frac{\tau_0}{\sqrt[n]{k} \cdot \mu_p} = k_1$, $\frac{\Delta p}{2l \cdot \tau_0} = k_2$, un $\frac{1}{n} = a$, ievietojot iegūtos lielumus vienādojumā (13) iegūstam:

$$du = k_1 (k_2 \cdot r - 1)^a \cdot dr\,. \tag{14}$$

Integrējot vienādojumu (14) un izdarot algebriskus pārveidojumus, iegūstam plūsmas ātruma izmaiņu pa caurules šķērsgriezumu:

$$u = \frac{2l \cdot n \cdot \tau_o^2}{\Delta p \cdot \mu_p (n+1) \cdot \sqrt[n]{k}} \left[\left(\frac{\Delta p \cdot r}{2l \cdot \tau_0} - 1 \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{\Delta p \cdot R}{2l \cdot \tau_0} - 1 \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]. \tag{15}$$

Iegūtais vienādojums apraksta plūsmas ātruma izmaiņu pa cauruļvada šķērsgriezumu dabīga mitruma sapropelim. Lai noteiktu šī vienādojuma atbilstību sapropeļa plūsmai cauruļvados, nepieciešams veikt sēriju plūsmas ātruma mērījumu dažāda sastāva sapropeļiem. Taču, ņemot vērā to, ka ar reometru veiktie sapropeļa tecēšanas mērījumi labi korelē ar vienādojumu (9), var cerēt, ka arī vienādojums (15) dos pietiekoši precīzus rezultātus

3. Secinājumi

1. Izstrādātais dabīga mitruma sapropeļa plūsmas vienādojums (9) nodrošina labu sakritību ar eksperimenta rezultātiem, determinācijas koeficients R^2=0.98.
2. Bezdimensionālie koeficienti *k* un *n* vienādojumā raksturo masas tiksotropiskās īpašības, masas reoloģiskie parametri - plastiskā viskozitāte un bīdes robežspriegums ērti nosakāmi no reogrammām.
3. Vienādojums (9) ir integrējams un tas dod iespēju iegūt plūsmas ātruma un caurplūdes izteiksmes sapropeļa plūsmu aprēķināšanai cauruļvados.
4. Iegūtais vienādojums var tikt pielietots citu, pēc uzbūves līdzīgu neņūtona šķidrumu, aprēķiniem, iepriekš nosakot koeficientu *k* un *n* vērtības.

Literatūra

1. Daniel Joseph, Yuriko Y. Renardy. (1993). Fundamentals of Two-Fluid Dynamics, Springer-Verlag New York, Inc. 429.
2. Ferguson, Kemblowski Z. (1991). Applied fluid rheology. London. 315.
3. Fizikālā un koloidālā ķīmija. U. Alksnis, Z. Kļaviņš u. c. (1990). Rīga: Zvaigzne. 248.
4. Kaķītis A. (1996). Sapropeļa reoloģiskās īpašības. LLU Raksti, Nr. 6 (283), Jelgava.102-108.
5. Kaķītis A. (1997). Sapropeļa tiksotropiskās īpašības. LLU Raksti, Nr. 9 (286), Jelgava. 100-102.
6. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. (1981). Инженерная реология пищевых материалов. Москва. 215.
7. Методические указания по расчету гидравлического транспорта сапропелей. (1981). Москва, 52.
8. Рейнер М. (1963). Деформация и течение. Москва. 381.