paragenetic and accumulating associations in topsoil and river sediments indicates that the main pollution sources can be traced even in river sediments (Pb-Sr-Ba association formed by "Ekranas" plant).

4.According to geochemical investigations in Panevėžys the pollutants get into water and sediments of dug wells mainly through surface runoff and are sorbed by the sediments. Though their concentration in water usually does not exceed the standard norms good care should be taken of them.

References

GEOCHEMICAL ATLAS OF PANEVĖŽYS, 1997, M 1:25000, Tverkutė, Z. (Panevėžys Municipality), Radzevičius, A., Budavičius, R., Kadūnas, V., Katinas, V., Zinkutė, R. (Institute of Geology), (Vilnius-Panevėžys, in English and Lithuanian), p. 18, 25 maps.

HN-60-1996, 1996, 'Kenksmingos medžiagos. Didžiausia leidžiama ir laikinai leidžiama koncentracija dirvožemyje', (Vilnius), p. 16.

HN-48-1994, 1994, 'Kenksmingos medžiagos. Didžiausia leidžiama koncentracija ir laikinai leidžiamas lygis žmogaus vartojamame vandenyje', (Vilnius), p. 42.

BALTAKIS, V., RADZEVIČIUS, A., 1995, 'Transporto įmonių teritorijų užterštumas sunkiaisiais metalais ir naftos produktais', *Geologijos mokslo pasiekimai - gamtosaugai,* (Vilnius), pp. 16-19.

KADŪNAS, V., KATINAS, V., RADZEVIČIUS, A., TARAŠKEVIČIUS, R., ZINKUTĖ, R., 1995, 'Metalo apdirbimo įmonių teritorijų grunto užterštumo ekologinis-geocheminis įvertinimas', *Geologijos mokslo pasiekimai - gamtosaugai,* (Vilnius), pp. 13-15.

RADZEVIČIUS, A., ZINKUTĖ, R., 1995, 'Nevėžio upės dugno nuosėdų užterštumas pavojingais cheminiais elementais Panevėžio mieste', *Mokslas. Technologija. Verslas,* (Pranešimų medžiaga (III), Panevėžys), pp. 52-53.

ZINKUTĖ, R., 1995, 'Panevėžio miesto dirvožemio geocheminis fonas', *Mokslas, technologija, verslas,* (Panevėžys) pp.50-51.

ВРЕДНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА, 1988-1989, (Справочник, Т.1-2, Ленинград: Химия), p. 512.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ХИМИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ, 1987, (Москва), p. 27.

SAPROPEĻA PLŪSMAS MODELĒŠANA

MODELLING OF SAPROPEL FLOW

AIVARS KAĶĪTIS, Mg. ing.
Mehānikas institūts, Latvijas Lauksaimniecības universitāte
J.Čakstes bulv. 5, Jelgava, Latvija, LV - 3001

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 dependence 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* $R^2=0.92\text{-}0.98$

ISBN - 9984-585-55 -7

The equation worked out for calculating of sapropel flow gives good accordance with experiment, R^2=0.97. It can be used for calculating of non-Newtonian flows.

Key words: sapropel, sludge, non-Newtonian fluid, viscosity and 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 enerģētiski ietilpīgākiem 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. Organiskā sapropeļa 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 [1]. 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 % [2]. 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 [2]:

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

kur τ_0 - bīdes robežspriegums, Pa;

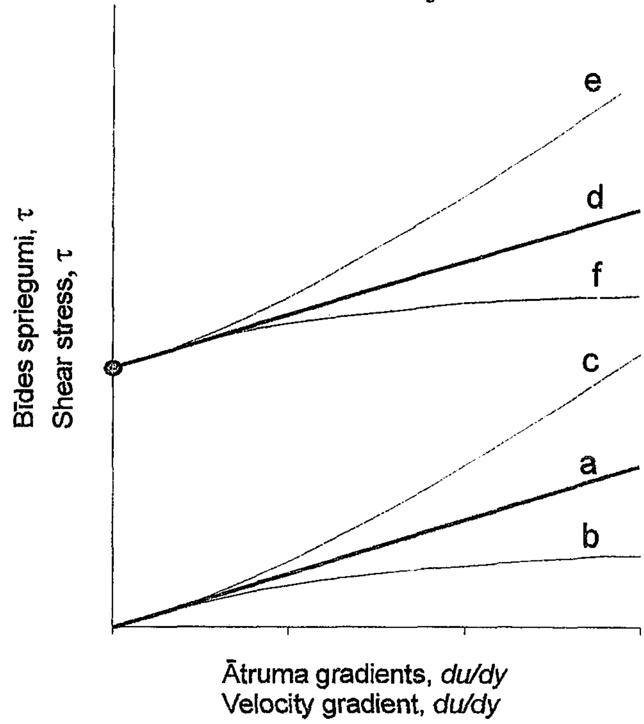
μ_p - plastiskā viskozitāte, Pa.s;

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 [3]. 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 [4]. 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 [5]:

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

(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 [5,6]:

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

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

ISBN - 9984-585-55 -7

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

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

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. Dažādojot kāpes rādītāja vērtību (vienādojums 5), 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 [3].

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:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 + \frac{\mu_p}{\tau_0}\frac{du}{dy}. \tag{7}$$

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:

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

Izsakot spriegumus *t*, iegūstam dabīga mitruma sapropeļa plūsmas reoloģisko modeli:

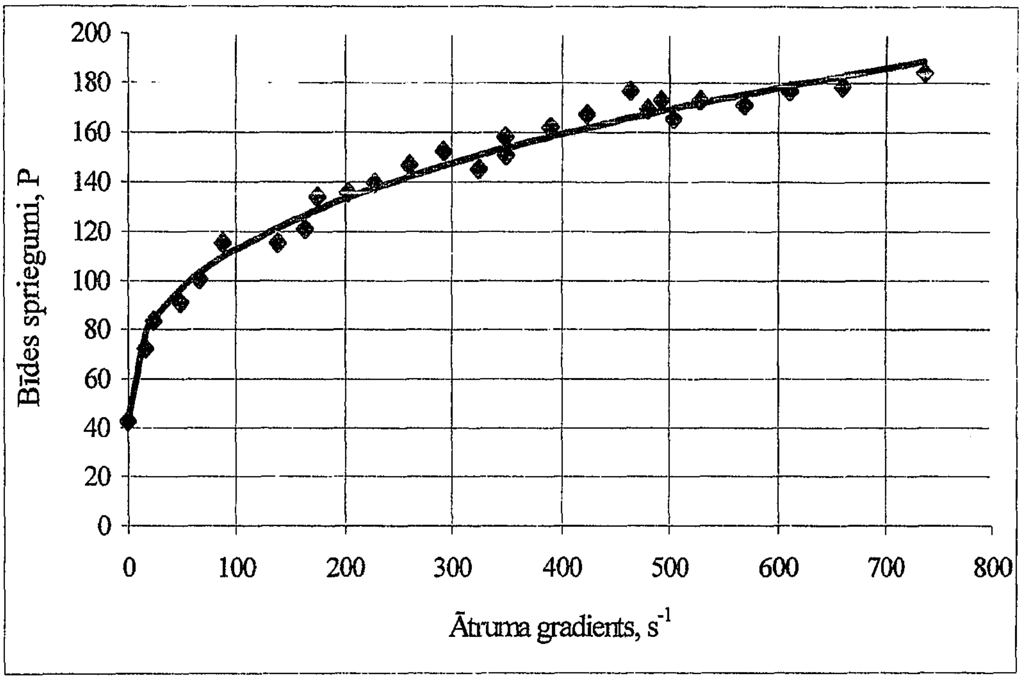
$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 + k\left(\frac{\mu_p}{\tau_0}\frac{du}{dy}\right)^n\right). \tag{9}$$

ISBN - 9984-585-55 -7

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 sapropeļa 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.

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. Dažādu mitrumu sapropeļiem determinācijas



2. att. Dinamisko bīdes spriegumu izmaiņa atkarībā no ātruma gradienta

Fig. 2. Changes of dynamic stress depending on velocity gradient.

koeficients svārstījās robežās R^2=0.92-0.98. Plūstamības līkne atbilstoši vienādojumam (9) sapropelim ar relatīvo mitrumu W=91.2 % un organiskās vielas saturu sausnā 62% parādīta 2. att.

Izmantojot datorprogrammu SPSS, tika noteikti vienādojuma koeficientu k=2.66 un n=0.43 vērtības. Plastiskās viskozitātes $\mu_{p\infty}$=0.11 Pa.s un sākotnējā bīdes robežsprieguma τ_∞=42.8 Pa vērtība atbilst šķidrumam ar pilnīgi izjauktu struktūru, un tās ir vismazākās vērtības.

$$\tau = \tau_\infty \cdot \left(1 + 2.66 \cdot \left(\frac{\mu_{p\infty}}{\tau_\infty} \frac{du}{dy} \right)^{0,43} \right). \tag{10}$$

ISBN - 9984-585-55 -7

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:

$$\frac{du}{dy}=\frac{\tau_\infty}{\sqrt[n]{k}\cdot\mu_{p\infty}}\sqrt[n]{\frac{\tau}{\tau_\infty}-1}\ . \tag{11}$$

Apaļā cauruļvadā bīdes spriegumus masā nosaka pēc formulas (pieņemot, ka nenotiek masas izslīdēšana pa caurules sieniņu) [7]:

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

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:

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

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

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

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

$$u=\frac{2l\cdot\tau_\infty^2}{\Delta p\cdot\mu_{p\infty}(m+1)\cdot k^m}\left[\left(\frac{\Delta p\cdot r}{2l\cdot\tau_\infty}-1\right)^{m+1}-\left(\frac{\Delta p\cdot R}{2l\cdot\tau_\infty}-1\right)^{m+1}\right]. \tag{15}$$

Iegūtais vienādojums apraksta plūsmas ātruma izmaiņu pa cauruļvada šķērsgriezumu dabīga mitruma sapropelim.
Lai izmantotu iegūto plūsmas modeli praktiskiem cauruļvadu aprēķiniem, nepieciešams atrast caurplūdes aprēķina vienādojumu atbilstoši iegūtajam plūsmas modelim. Caurplūdi Q varam aprēķināt no vienādojuma (16) [7,8]:

$$\frac{Q}{\pi\cdot R^3}=\frac{1}{\tau_w^3}\int_0^{\tau_w}\tau^2 f(\tau)d\tau, \tag{16}$$

kur τ_w - bīdes spriegumi uz cauruļvada iekšējās sieniņas, pieņemot, ka masas izslīdēšana nenotiek, Pa;
$f(t)$ - bīdes spriegumu izmaiņas funkcija, $f(t)=du/dy$, t.i. atbilst ātruma gradienta izteiksmei iegūtajā plūsmas reoloģiskajā modelī (vienādojums 11).

ISBN - 9984-585-55 -7

Bīdes spriegumus uz cauruļvada iekšējās sieniņas aprēķina pēc formulas [8]:

$$\tau_w = \frac{R \cdot \Delta p}{2l}. \tag{17}$$

Ievietojot vienādojumus (11) un (17) vienādojumā (16) un pārveidojot, iegūstam caurplūdes aprēķina vienādojumu:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}}{\tau_w^3 \mu_{p\infty}} \int_{\tau_\infty}^{\tau_w} \tau^2 (\tau - \tau_0)^{1/n} d\tau. \tag{18}$$

Vienkāršošanas labad apzīmēsim konstanto reizinātāju pirms integrāļa ar b un kāpinātāju $1/n=m$:

$$b = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}}{\tau_w^3 \mu_{p\infty}}. \tag{19}$$

Iegūstam:

$$Q = b \int_{\tau_\infty}^{\tau_w} \tau^2 (\tau - \tau_\infty)^m d\tau. \tag{20}$$

Integrējot iegūto vienādojumu (20) robežās no τ_0 līdz τ_w un izdarot algebriskus pārveidojumus, iegūstam plūsmas aprēķina vienādojumu dabīga mitruma sapropelim apaļā cauruļvadā:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{p\infty} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m + \cdot A)}{(2+m)(1+m)}\right] \tag{21}$$

Lielums A izsaka masas kustības sākuma nosacījumus cauruļvadā:

$$\frac{2l\tau_\infty}{R \cdot \Delta p} = A. \tag{22}$$

ja $A>1$, $Q=0$, t.i. masas kustība cauruļvadā nenotiek,

ja $A<1$, $Q>0$, sākas masas kustība cauruļvadā.

Vienādojums (21) apraksta plastiska (pastveida) šķidruma caurplūdi pa apaļu cauruļvadu atkarībā no spiediena krituma Δp uz cauruļvada posmu. Iegūtais vienādojums ir derīgs strukturālam (lamināram) plūsmas režīmam.

Lai izdarītu vienādojuma (21) pārbaudi, ievietojam $m=1$un $k=1$, pēc algebriskiem pārveidojumiem iegūstam Bukingema vienādojumu, kas apraksta Bingama plastiskā šķidruma caurplūdi apaļā cauruļvadā [5,7,8]:

$$Q = \frac{\pi R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_p}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p}\right)^4\right], \tag{23}$$

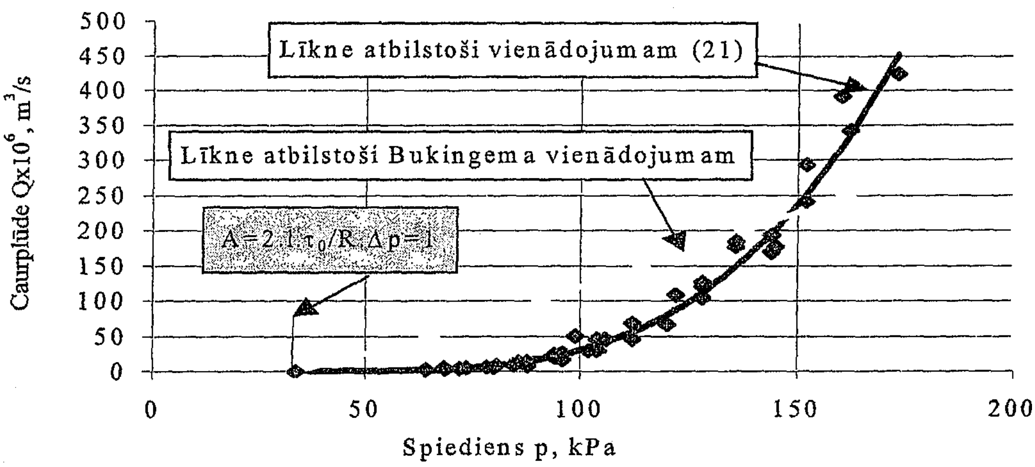
īsto (Ņūtona) šķidrumu gadījumā $\tau_0=0$ un $\tau_p=\tau$ iegūstam Puazeiļa vienādojumu [8].

ISBN - 9984-585-55 -7

Iegūtais vienādojums, līdzīgi kā Bukingema vienādojums (23), nav atrisināms attiecībā pret Δp, kas rada neērtības praktiskos aprēķinos.

Lai noteiktu vienādojuma (21) atbilstību reālajai plūsmai, tika izdarīta sērija eksperimentu, kuros noteicām dabīga mitruma sapropeļa caurplūdi atkarībā no spiediena krituma uz cauruļvada posma garumu. Eksperimentos tika izmantots sapropelis ar relatīvo mitrumu W=92% un organiskās vielas saturu sausnā 63%. Mērījumi izdarīti ar dažāda garuma un diametra cauruļvadu posmiem.

Iegūtie rezultāti parādīja labu teorētiski iegūto caurplūdes vērtību sakritību ar eksperimentālajām (3.att.). Determinācijas koeficients R^2=0,97.



3.att. Caurplūdes izmaiņa atkarībā no spiediena krituma uz cauruļvada posma garumu. Caurules iekšējais diametrs d=16 mm, garums l=1m, sapropeļa plastiskā viskozitāte $\mu_{p\infty}$=0.75Pa.s, bīdes robežspriegums τ_∞=135 Pa, m=3,45 un k=2,9.

Fig. 3. Changes of flow dependending on pressure drop. Inside diameter of pipe d=16 mm, lenght l=1m, plastic viscosity $\mu_{p\infty}$=0.75Pa.s, boundary shear stress τ_∞=135 Pa, m=3,45 and k=2,9.

3. Secinājumi

1. Izstrādātais dabīga mitruma sapropeļa plūsmas modelis (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. Iegūtais caurplūdes vienādojums (21) dod labu sakritību ar eksperimenta rezultātiem, R^2= 0.97. Tas var tikt izmantots neņūtona šķidrumu cauruļvadu aprēķinos, iepriekš nosakot koeficientu k un m vērtības.

LITERATŪRA

1. Daniel Joseph, Yuriko Y. Renardy. (1993). Fundamentals of Two-Fluid Dynamics, Springer-Verlag New York, Inc. 429.
2. Методические указания по расчету гидравлического транспорта сапропелей. (1981). Москва, 52 с.

ISBN - 9984-585-55 -7

3. Kaķītis A. (1996). Sapropeļa reoloģiskās īpašības // LLU Raksti, Nr. 6 (283), Jelgava – 102.-108. lpp.
4. Fizikālā un koloidālā ķīmija / Alksnis U., Kļaviņš Z. - Rīga: Zvaigzne, 1990. - 248 lpp.
5. Ferguson, Kemblowski Z. (1991). Applied fluid rheology. London. 315.
6. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. - Москва, 1981. - 215.с.
7. Рейнер М. Деформация и течение. - Москва, 1963. - 381.с.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987. - 840 с.

FIZIKĀLU PROCESU SKAITLISKĀ MODELĒŠANA PLĀNOS SLĀŅOS

H.KALIS, I.KANGRO*
Zeļļu 8, Rīga, Latvija,
*Atbrīvošanas aleja 76, Rēzekne, Latvija, LV - 4600

Apakšzemes slāņainās sistēmās fizikālie parametri vertikālā virzienā ir konstanti lielumi, kuru vērtības mainās plānos slāņos ar lēcieniem. Ņemot vērā sistēmas kārtaino struktūru, aprēķinot fizikālos lielumus (temperatūru, koncentrāciju slāņos), lieto dažāda tipa viduvēšanas [3] vai režģa metodes, izvēloties katrā slānī vismaz vienu režģa līniju [1,2]. Līdz ar to iespējams samazināt risināmās problēmas dimensitāti: paraboliskā vai eliptiskā tipa parciālā diferenciālvienādojuma vietā var risināt 1. un 2. kārtas parasto diferencālvienādojumu sistēmu. Šīs metodes ir taišņu metodes pamatā. Svarīgi ir pēc iespējas samazināt parasto diferenciālvienādojumu skaitu nepieciešamās precizitātes sasniegšanai.

Viduvēšanas rezultātā katrā slānī rodas viens diferenciālvienādojums, bet režģa metodē, lietojot integrēšanu un interpolāciju vai galīgo tilpumu elementus, vismaz viens diferenciālvienādojums (1.veida robežnosacījumu gadījumā) vai 3 vienādojumi (3.veida robežnosacījumu gadījumā). Izrādās, ka ar režģa metodi var iegūt 2 diferenciālvienādojumu sistēmu, kuri jāintegrē pa dažādu vidu saskares līnijām, pie tam precizitāte ir augstāka nekā vienkāršai viduvēšanas metodei. Konstantu koeficientu gadījumā ir iespējams iegūt analītiskos atrisinājumus formulu veidā.

1.Problēmas formulējums

Bieži vien fizikālie lielumi jāaprēķina tikai uz pētāmā objekta virsmas. Tāpat, žāvējot dažādus materiālus, kuru biezums nav liels, pētot fizikālus procesus (temperatūru, koncentrāciju), rodas nepieciešamība risināt paraboliskā vai eliptiskā tipa parciālos diferenciālvienādojumus plānos slāņos, piemēram, z koordinātes virzienā. Mēs pieņemsim, ka šajos procesos siltuma izstarošana nenotiek, bet siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi raksturo 3. veida robežnosacījums formā

$$-\lambda(\partial T / \partial n) = \alpha(T - T_a), \tag{1}$$

kur λ, α, T_a ir siltuma vadīšanas, apmaiņas koeficienti un ārējās vides temperatūra, n – robežvirsmas ārējās normāles vektors. Ja vide nav homogēna, tad uz dažādu vidu saskares līnijām ir spēkā nepārtrauktības nosacījumi

$$[T] = [\lambda(\partial T / \partial n)] = 0, \tag{2}$$