NEFTKİMYA AVADANLIQLARI

UOT 532.536

TEXNOLOJİ QURĞULARDA KÜTLƏDƏYİŞDİRİCİ SİSTEMLƏRİN HİDRODİNAMİK HESABI

MƏMMƏDOV Q.Ə., İSMAYILOV R.Ş.
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
E-mail: rasim.ismayilov.46@mail.ru.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАССООБМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИХСКИХ УСТРОЙСТВ

МАМЕДОВ Г.А., ИСМАЙЛОВ Р.Ш.
Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности

HYDRODYNAMIC CALCULATION OF MASS-EXCHANGE SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL DEVICES

MAMEDOV G.A., ISMAYLOV R.Sh.
Azerbaijan State University of Oil and Industry

Xülasə. Texnoloji qurğularda kütlədəyişdirici sistemlərin hidrodinamik hesabat üsulu işlənmişdir. Bunun üçün dəyişən kütləli maye axınının vektorial tənliklər sistemi birölçülü formaya gətirilmişdir. Kütlədəyişdirici sistemlərdə ideal və özlü maye axınının riyazi modeli qurulmuşdur. Real mayenin birölçülü axını prosesində sürtünmədən yaranan basqı (təzyiq) itgisi və müxtəlif zonalar üçün müqavimət əmsalı nəzərə alınmaqla kütlədəyişdirici qurğuların ümumiləşmiş hidrodinamik hesabat düsturu çıxarılmışdır. Hesabat düsturlarının eksperimentlə yaxşı adekvat olduğu müəyyən olunmuşdur.

Acar sözlər. Hidrodinamika, kütlədəyişdirici sistem, dəyişən kütləli maye, potensial axın, özlü maye, hidravlik müqavimət əmsalı.

Аннотация. Приведен гидродинамический метод расчета массообменных систем технологических установок. С этой целью векторное уравнение движения потока жидкости переменной массы преобразован в одномерную форму. Разработан математическая модель одномерного течения идеальной и реальной жидкостей в массо-обменных устройствах. Учитывая различные зоны сопротивления и режимов течения из дифференциального уравнения одномерного потока с непрерывной раздачей расхода получено обобщенное формула для расчета массообменных систем. Сравнения расчетных и экспериментальных данных показах их адекватность.

Ключевые слова. Гидродинамика, массообменные устройства, жидкость с переменной массой, потенциальное течение, вязкая жидкость, коэффициент гидравлического трения.

Annotation. The hydrodynamic method for calculating mass transfer systems of technological installations is given. To this end, the vector equation of motion of the fluid flow of variable mass is transformed into a one-dimensional form. A mathematical model of the one-dimensional flow of ideal and real liquids in mass transfer devices has been developed. Taking into account the different zones of resistance and flow regimes, a generalized formula for calculating mass transfer systems is obtained from the differential equation of a one-dimensional flow with continuous flow rate distribution. Comparison of calculated and experimental data shows their adequacy.

Keywords: Hydrodynamics, mass transfer devices, fluid with variable mass, potential flow, viscous fluid, coefficient of hydraulic friction.

Giriş. Kütlədəyişdirici qurğularda maye axını dinamikasına aid problemlərin dairəsi çox genişdir və xüsusilə son zamanlarda daha intensiv inkişaf edir. Bu istilik- və hidroenergetik qurğuların, neft və qaz quyularının qazılmasının, neft və qazın nəqlinin, neft və kimya texnologiyasının, su təsərrüfat sistemlərinin, hidrosferanın mühafizəsinin və bir çox başqa texniki sistemlərin praktiki məsələlərin həllinə tətbiqindən irəli gəlir. Qeyd olunan texnoloji qurğuların hidrodinamikasının xarakterik xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, mayenin kollektorda (kanalda, boruda) hərəkəti zamanı onun kütləsi (sərfi) dəyişir. Yəni kütləşdirici kollektorda axan mayeyə onun məsaməli (deşikli, yarıqlı) divarlarından kəsilməz olaraq əlavə maye ya birləşir, yaxutda ondan ayrılır. Bunun nəticəsində kollektorun uzunluğu boyunca mayenin sərfi uyğun olaraq ya artır, ya da azalır.

Tədqiqatın məqsədi: Kütləşdirici kollektorda maye axını prosesinin riyazi modelini yazmaq üçün dəyişən kütləli mühitin dinamik tənliklər sistemindən istifadə edək [1]. Əvvəlcə sadəlik üçün ideal mayenin qərarlaşmış (stasionar) axınına baxaq. Bu halda maye axınının dinamik tənliyi vektorial formada aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$(\overline{\upsilon}\nabla)\overline{\upsilon} = \vec{F} - \frac{1}{p}\nabla P + (\bar{k}-1)\overline{\upsilon}q \qquad (1)$$

burada $\overline{\upsilon}$ -maye axının sürət vektoru; ρ –sıxlıq; P-təzyiq; q-kütlənin dəyişmə intensivliyini; $k = \overline{\upsilon}_*/\overline{\upsilon}$; υ_* –birləşən (yaxud ayrılan) kütlənin sürəti, ∇ -nabla.
(1) tənliyinin hər iki tərəfini dekart koordinat oxları üzərinə proyeksiyalasaq alarıq:

$$\left.\begin{aligned}
\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_x}{\partial x} + \upsilon_y\frac{\partial\upsilon_x}{\partial y} + \upsilon_z\frac{\partial\upsilon_x}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + (k_x-1)\upsilon_x q\\
\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_y}{\partial x} + \upsilon_y\frac{\partial\upsilon_y}{\partial y} + \upsilon_z\frac{\partial\upsilon_y}{\partial z} = F_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + (k_y-1)\upsilon_y q\\
\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_z}{\partial x} + \upsilon_y\frac{\partial\upsilon_z}{\partial y} + \upsilon_z\frac{\partial\upsilon_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + (k_z-1)\upsilon_z q
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Analizin əlverişliyi üçün başlanğıc bərabərliyi pozmadan (2) sisteminin birinci tənliyinin sol tərəfinə $\upsilon_y\,\partial\upsilon_y|dx + \upsilon_z\partial\upsilon_z|dx$ kəmiyyətini əlavə edək və çıxaq:

$$\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_X}{\partial x} + \upsilon_y\frac{\partial\upsilon_X}{\partial y} + \upsilon_z\frac{\partial\upsilon_X}{\partial z} - \upsilon_y\left(\frac{\partial\upsilon_y}{\partial x} - \frac{\partial\upsilon_X}{\partial y}\right) +$$

$$+\upsilon_z\left(\frac{\partial\upsilon_X}{\partial z} - \frac{\partial\upsilon_z}{\partial x}\right) = F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + (k_x-1)\upsilon_x q \qquad (3)$$

Burada nəzərə alsaq ki,

$$\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_X}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon_x^2}{2}\right), \quad \upsilon_y\frac{\partial\upsilon_y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon_y^2}{2}\right), \quad \upsilon_z\frac{\partial\upsilon_z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon_z^2}{2}\right),$$

və

$$\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_X}{\partial x} + \upsilon_y\frac{\partial\upsilon_y}{\partial x} + \upsilon_z\frac{\partial\upsilon_z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right),$$

burada $\upsilon = \upsilon_x^2 + \upsilon_y^2 + \upsilon_z^2$.
Nəticədə (3) tənliyini aşağıdakı kimi yazmaq olar

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} - F_x = 2(\upsilon_y\omega_z - \upsilon_z\omega_y) + (k_x-1)\upsilon_x q. \qquad (4)$$

Eyni qayda ilə (2) sisteminin ikinci və üçüncü tənliklərini çevirsək alarıq:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} - F_x = 2(\upsilon_y\omega_z - \upsilon_z\omega_y) + (k_x-1)\upsilon_x q\\
\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} - F_y = 2(\upsilon_z\omega_x - \upsilon_x\omega_z) + (k_y-1)\upsilon_y q\\
\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} - F_z = 2(\upsilon_x\omega_y - \upsilon_y\omega_x) + (k_z-1)\upsilon_z q
\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Burada $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ fırlanma bucaq sürətinin komponentləridir [2, 3]

$$\omega_x = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\upsilon_z}{\partial y} - \frac{\partial\upsilon_y}{\partial z}\right), \omega_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\upsilon_x}{\partial z} - \frac{\partial\upsilon_z}{\partial x}\right), \omega_z = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\upsilon_y}{\partial x} - \frac{\partial\upsilon_x}{\partial y}\right).$$

Beləliklə dəyişən kütləli maye axını üçün (5) –də göstərilən formada yazılmış dinamika tənlikləri, burulğan hərəkəti potensial hərəkətdən ayırmağa imkan verir. Potensial (burulğansız) hərəkətlər üçün $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$, onda (5) aşağıdakı şəkilə düşür:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}-F_x=(k_x-1)\upsilon_x q\\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}-F_y=(k_y-1)\upsilon_y q\\ \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}-F_z=(k_z-1)\upsilon_z q\end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Əgər mayeyə təsir edən həcmi (kütləvi) qüvvələr potensialdırsa, onda

$$F_x=\frac{\partial \Pi}{\partial x};\; F_y=\frac{\partial \Pi}{\partial y}; F_z=\frac{\partial \Pi}{\partial z}$$

F_x, F_y, F_z –in qiymətlərini (6) sistemində yerinə yazsaq, potensiallı həcmi qüvvələrin təsiri altında olan stasionar ideal maye axınının tənliyini aşağıdakı kimi alarıq:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi\right)=(k_x-1)\upsilon_x q\\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi\right)=(k_y-1)\upsilon_y q\\ \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi\right)=(k_z-1)\upsilon_z q\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

(7) sisteminin hər bir tənliyini uyğun olaraq dx, dy və dz -ə vurub, həmçinin nəzərdə tutsaq ki, $\upsilon^2=\upsilon_x^2+\upsilon_y^2+\upsilon_z^2$ və q=(dm/dt) /m, alarıq:

$$d\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi\right)=(k-1)\upsilon^2\frac{dm}{m}. \qquad (8)$$

Burada m-mayenin kütlə sərfidir. Bu tənlikdə $(k-1)\upsilon^2$ dm/m=0 (yəni mayenin axını zamanında ona birləşən, yaxud ondan ayrılan kütlə sərfi olmadıqda) şərti daxilində, (8) –dən alırıq:

$$d\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi\right)=0. \qquad (9)$$

Buradan

$$\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi=const\,, \qquad (10)$$

xüsusi hal kimi Bernulli-Eyler inteqralını alarıq [2, 4, 6]

Əgər həcmi qüvvələr ağırlıq qüvvəsidirsə və z oxu şaquli istiqamətdə yuxarı yönəldibsə, onda $\Pi=-gz$ (haradakı g-ağırlıq qüvvəsinin təcilidir) Nəticədə (10) aşağıdakı şəkilə düşər [2, 4].

$$\frac{\upsilon^2}{2g}+\frac{P}{\gamma}+z=const\,. \qquad (11)$$

Bu tənlik hidravlikanın əsas tənliyi –Bernulli tənliyidir. (11) ifadəsinə daxil olan hədlərinin hamısının ölçü vahidi, uzunluq ölçü vahididir [5].

Xüsusi kütlə sərfini (vahid en kəsik sahəsində) $m=\rho\upsilon$ -yə bərabər qəbul edərək, (8)- də bəzi çevirmələr apardıqdan və inteqralladıqdan sonra alarıq:

$$(2-k)\frac{\upsilon^2}{2g}+\frac{P}{\gamma}+z=const. \qquad (12)$$

Burada γ –mayenin xüsusi çəkisidir ($\gamma=\rho g$).

Bu münasibət, dəyişən kütləli ideal sıxılmayan mayenin potensial axınının bütün sahəsində yerinə yetirilir. Əgər axın, burulğan axın sahəsində baş verirsə, bu halda (5) aşağıdakı şəkilə gətirilir:

$$d\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}-\Pi\right)+(1-k)\upsilon^2\frac{dm}{m}=2\overline{D}. \qquad (13)$$

Burada

$$\overline{D}=\begin{vmatrix} dx & dy & dz \\ \upsilon_x & \upsilon_y & \upsilon_z \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{vmatrix} \qquad (14)$$

(13) tənliyini təyinedicinin sıfıra bərabər olan halında inteqrallamaq mümkündür, yəni $\overline{D}$=0, bu o vaxt mümkündür ki, aşağıdakı hallar ödənilsin [2, 5]

1) $\upsilon_x=\upsilon_y=\upsilon_z=\upsilon=0$; 2) $\omega_x=\omega_y=\omega_z=\omega=0$;

3) $dx/\upsilon_x = dy/\upsilon_y = dz/\upsilon_z$; 4) $\upsilon_x/\omega_x = \upsilon_y/\omega_y = \upsilon_z/\omega_z$

Onda (13) tənliyindən alarıq

$$(2-k)\frac{\upsilon d\upsilon}{g}+d(P/\gamma)+dz=0 \qquad (15)$$

(15) tənliyini inteqralladıqdann sonra, (12) –ni alarıq.

İndi isə potensiallı həcmi qüvvələr təsir edən dəyişən kütləli özlü sıxılmayan mayenin stasionar axınına baxaq. Bu halda özlü sıxılmayan mayelər üçün dinamikanın tənliyi belə yazılır [1]:

$$(\overline{\upsilon}\cdot\nabla)\overline{\overline{\upsilon}}=\vec{F}-\frac{1}{p}\nabla P+\nu\nabla^2\overline{\upsilon}+(\overline{k}-1)\overline{\upsilon}q, \qquad (16)$$

burada ν - kinematik özlülük əmsalı.

(16) tənliyinin hər iki tərəfini dekart kordinat sisteminin oxları üzərinə proyeksiyalayıb və orada $\upsilon^2=\upsilon_x^2+\upsilon_y^2+\upsilon_z^2$ nəzərdə tutmaqla, bəzi çevrilmələr apardıqdan sonra alarıq:

$$\left.\begin{aligned} 2(\upsilon_z\omega_y-\upsilon_y\omega_z)&=F_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right)+\nu\nabla^2\upsilon_x+(k-1)\upsilon_x q \\ 2(\upsilon_x\omega_z-\upsilon_z\omega_x)&=F_y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}-\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right)+\nu\nabla^2\upsilon_y+(k-1)\upsilon_y q \\ 2(\upsilon_y\omega_x-\upsilon_x\omega_y)&=F_z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right)+\nu\nabla^2\upsilon_z+(k-1)\upsilon_z q \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Nəzərə alsaq ki, həcmi qüvvələr potensiallıdır, yəni $\overline{F}=\nabla\Pi\left(F_x=\partial\Pi/\partial x, F_y=\partial\Pi/\partial y, F_x=\partial\Pi/\partial z\right)$. Onda (17) tənliyini uyğun olaraq elementar yerdəyişmənin proyeksiyalarına (dx, dy, dz) vurub, onları tərəf-tərəfə toplasaq, alarıq:

$$d\left(\frac{\upsilon^2}{2}+\frac{P}{\rho}+A-\Pi\right)+(1-k)\upsilon^2\frac{dm}{m}=2\overline{D} \qquad (18)$$

burada dA- mayenin vahid kütləsinin cərəyan xətti boyunca elementar yerdəyişməsində özlü qüvvənin gördüyü işdir:

$$dA=-\nu\left(\nabla^2\upsilon_x \mathrm{dx}+\nabla^2\upsilon_y \mathrm{dy}+\nabla^2\upsilon_z \mathrm{dz}\right).$$

Əgər (18) tənliyində təyinedici sıfra çevrilsə ($\overline{D}=0$) və həcmi qüvvələr (bu qüvvələrin potensialı $\Pi=-gz$) ancaq ağırlıq qüvvələrindən ibarət olsa, yaza bilərik

$$(2-k)\frac{\upsilon}{g}d\upsilon+dh_f+\frac{dP}{\gamma}+dz=0 \qquad (19)$$

burada dh_f – sürtünmədən yaranan basqı itgisidir,

$$dh_f=\frac{dA}{g}=\frac{\lambda}{D}\frac{\upsilon^2}{2g}dx, \qquad (20)$$

λ –sürtünmə əmsalı, D-ekvivalent diametridir.

(19) tənliyi, sərf yol boyunca dəyişdikdə, real mayelərin kütlədəyişdirici kollektorlarda (kanallarda, borularda, aparatlarda və b) axınının hidrodinamik parametrlərini təyin etməyə imkan verir.

Tədqiqatın metodiki bazası və nəticələrin riyazi işlənməsi. Divarı məsaməli (deşikli, maye keçirə bilən) kollektorlarda dəyişən kütləli mayenin biroxlu axınına baxaq. Mayenin hərəkəti istiqamətində kollektorun en kəsiyi sahəsinin (diametrinin) sabit olduğunu qəbul edək.

Kollektorda sərfi fasiləsiz olaraq dəyişən mayenin axını zaman onun uzununa və eninə sürətin dəyişməsinə, həmçinin hidrodinamik sürtünmənin, turbulentlik dərəcəsinin və sərhəd layının qalınlığının dəyiçməsinə gətirir. Sərfin dəyişməsi və sürtünmədən yaranan itgi nəticəsində məsaməli (mayeni keçirə bilən) divarlı kollektorun uzunu boyu təzyiq dəyişməsi baş verir. Burada təzyiq arta, azala və yaxud sabit ola bilər, buna əsas səbəb hər şeydən əvvəl ətalət (inersiya) effektinin başlıca rol oynamasıdır. Qoyulmuş məsələni həll etmək üçün (19), (20) və kəsilməzlik tənliklərindən istifadə edək. Bu tənlikləri horizontal kollektorlar üçün aşağıdakı kimi yazaq:

$$-\frac{dP}{dx} = (2\alpha_0 - k)\rho\frac{Q}{\omega^2}\frac{dQ}{dx} + \frac{\lambda}{D}\frac{\rho Q^2}{2g\omega^2} \qquad (21)$$

$$\frac{dQ}{dx} = \pm q \qquad (22)$$

burada: P-təzyiq , N/m^2; Q-mayenin həcmi sərfi (Q=$\upsilon\omega$), m^3/s; ω –canlı en kəsik sahəsi (ω=const), m^3; ρ – mayenin sıxlığı, kq/ m^3; α_0-sürətin qeyri –bərabər paylanması əmsalı ($\alpha_0 > 1$); λ- sürtünmə əmsalı; k=υ_*/υ,υ_* - ayrılan (birləşən) kütlənin əsas axının orta sürəti υ istiqaməti üzərindəki proyeksiyası; q_*-ayrılan (birləşən) kütlənin intensivliyi, m^2/s; x- uzununa kordinat, m.

(21) tənliyi birölçülü maye axını modelinin riyazi ifadəsidir, hansı ki, bunun köməkliyi ilə sabit en kəsikli kütlədəyişdirici qurğuların, kollektorların (boruların) uzunluğu boyunca təzyiq dəyişməsini təyin etmək üçün hesabat düsturlarını almaq olar.

Bu tənlik axın rejimi üzərinə heç bir məhdudiyyət qoymur. Odur ki, bundan laminar və turbulent axınlara aid məsələlərin həllində istifadə oluna bilər. Məsələni həll etmək üçün λ-əmsalının məlum ifadəsindən istifadə etmək lazımdır. Hidravlik sürtünmə əmsalı λ ümumi halda hərəkətin rejimindən, boruların kələkötürlüyündən və diametrindən, orta sürətdən və s.asılıdır. Müəyyən edilmişdir ki, özlü mayelərin müxtəlif rejimlərdə axını zamanı beş müqavimət zonası müşahidə olunur [2-6].

Birinci zona – özlü müqavimət zonasında mayenin axıma rejimi laminardır və Reynolds ədədi $R_e \leq 2320$. Bu halda λ, Puazeyl düsturuna görə təyin olunur:

$$\lambda = 64/Re \qquad (23)$$

burada Re =$\upsilon D/\nu$ Reynolds ədədi; D-kollektorun (borunun) diametri, m; $\nu-$kinematik özlülük əmsalı, m^2/s; υ-axının orta sürəti, m/s.

İkinci zona –laminarlıqdan turbuletliyə (yaxud əksinə) keçid zonasında Re=$(2 \div 4)10^3$, bu zonada λ, R.M.Zayçenko düsturuna görə təyin olunur:

$$\lambda = 0{,}0025\sqrt[3]{Re} \qquad (24)$$

Üçüncü zona –hamar divarlı borular zonasında (yəni “hidravliki hamar boru”), mayenin axma rejimi turbulentdir, bu zona $4 \cdot 10^3 < Re < 10 \cdot D/\Delta$ (burada Δ-kanalın divarının ekvivalent kələkötürlüyüdür) olduqda müşahidə olunur. Bu zonada λ, Blazius düsturuna görə təyin olunur:

$$\lambda = 0{,}3164Re^{-0{,}25} \qquad (25)$$

Dördüncü zona –kvadratik müqavimətə qədərki zona, yəni “hidravlik hamar”-dan “tamam kələkötür” boruya küçid zonası mayenin axma rejimi turbulentdir. Bu zona $10 \cdot D/\Delta \leq Re \leq 500 \cdot D/\Delta$ olduqda müşahidə olunur, sürtünmə əmsalı λ, V.D.Belousov düsturuna görə təyin olunur [5]:

$$\lambda = \frac{10^{\chi}}{Re^{-0{,}123}}, \qquad \chi = \frac{0{,}127g\Delta}{D} - 0{,}627 \qquad (26)$$

Beşinci zona- kvadratik müqavimət zonasında yəni “tamam kələkötür” boru, rejim turbulentdir. Bu zonada Re$> 500 \cdot D/\Delta$ olduqda sürtünmə əmsalı λ, Şifrinson düsturuna görə təyin olunur

$$\lambda = 0{,}11(\Delta/D)^{0{,}25} \qquad (27)$$

(23)÷(27) ifadələrini birləşdirərək praktiki hesabatlar üçün əlverişli olan, vahid bir formada aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\lambda = a/Re^{n} \qquad (28)$$

burada a- əmsalı və n üstü mayenin hərəkət rejimindən asılı olaraq müxtəlif qiymətlər alırlar (cədvəl 1).

(21) tənliyinə (28)-i daxil edib və orada (22) –ni nəzərdə tutaraq, kollektorda sərfin azalan halı üçün, müvafiq çevrilmələr apardıqdan və (0,x) intervalında inteqrallamadan sonra alarıq:

$$P_0 - P_x = (2\alpha_0 - k)\rho \upsilon_0^2 \alpha J_1 + \frac{a\nu^{n} \cdot \upsilon_0^{2-n}}{2D} J_2 \qquad (29)$$

burada $\alpha = q/Q_0$

$$J_1 = \alpha \int_0^x \left(\frac{1}{\alpha} - x\right) dx \qquad (30)$$

$$J_2 = \alpha \int_0^x \left(\frac{1}{\alpha} - x\right)^{2-n} dx \qquad (31)$$

J_1 $v\partial J_2$ İnteqrallarında aşağıdakı dəyişənə keçsək

$$\varphi = \frac{1}{\alpha} - x; \quad d\varphi = -dx \qquad (32)$$

və alınan nəticəni inteqrallasaq, təzyiqin kollektor boyunca dəyişmə düsturunu alarıq:

$$P_x = P_0 + (2\alpha_0 - k)\rho \frac{\upsilon_0^2}{2}[1 - (1 - \alpha x)^2] -$$

$$- \frac{a\nu^{n}\upsilon_0^{2-n}}{2g(3-n)D}\rho[1 - (1 - \alpha x)^{3-n}] \qquad (33)$$

burada a və n-in qiyməti axının rejimindən asılı olaraq 1 cədvəlindən götürülməlidir.

Cədvəl 1.

Müqavimət zonası	Hərəkət rejimi	a	n
1	Laminar rejim, özlü müqavimət zonası, $R_e \leq 2320$	64	1
2	Laminarlıqdan turbulentliyə (yaxud əksinə) keçid zonası, $R_e = (2 \div 4) \cdot 10^3$	0,0025	1/3
3	Turbulent rejim, hamar divarlı müqavimət, $4 \cdot 10^3 < 10 \cdot D/A$	0,3164	0,25
4	Turbulent rejim, kvadratik müqavimətə qədərki zona, $10 \cdot D/A \leq \mathrm{Re} \leq 500 \cdot D/A$	10^{X}, X=0,127g $\Delta/D - 0{,}627$	0,123
5	Turbulent rejim, kvadratik müqavimət zonası, $\mathrm{Re} > 500 \cdot D/A$	$0{,}11(\Delta/D)^{0{,}25}$	0

(33) tənliyi, maye axınının müxtəlif müqavimət zonalarında və rejimlərində sərfi fasiləsiz azalan borunun (kollektorun, hidrosisteminin) uzunu boyu təzyiqin dəyişməsini təyin etməyə imkan verir. Bu tənliyə daxil olan (28) ifadəsində a-əmsalı və n üstü (23)-(27) düsturuna və yaxud 1 cədvəlinə əsasən təyin olunur. (33) tənli-yinə daxil olan α_0-sürətin borunun en kəsiyində qeyribərabər paylanması əmsalı, laminar rejimli axında $\alpha_0 = 1{,}33$ -2,0 turbulent rejimdə isə $\alpha_0 = 1{,}02 - 1{,}06$ intervalında dəyişir, k-əmsalı isə təcrübi tədqiqatlar nəticəsində təyin olunmuşdur. Hidravlik qurğuda müxtəlif materiallardan (polad, düraliminium, şüşə) hazırlanmış borularda eksperimentlər aparılmışdır. Təcrübi borunun uzunluğu, diametri, perforasiyası müxtəlif diametrdə olmuşdur. Təcrübələr ən azı üç dəfə təkrarlanmışdır. Nəticədə k əmsalı üçün aşağıdakı düstur alınmışdır

$$k = \beta^{0{,}38}, \qquad \beta = (1 - Q_t/Q_0), \qquad (34)$$

burada Q_0, Q_t-başlanğıc və tranzit sərf. (33) tənliyində (34) ifadəsini nəzərə almaqla hesabatlar aparılmış və onların eksperimentlərin nəticəsi ilə adekvatlığı yoxlanılmışdır. Hesabatın nəticələrinin eksperimentlə yaxşı uzlaşması müəyyən olunmuşdur.

Nəticə. Müxtəlif müqavimət zonaları və axının sərfinin dəyişməsini nəzərə almaqla kütlədəyişdirici qurğuların ümumiləşmiş hesabat düsturu çıxarılmışdır.

Ədəbiyyat

1. Мамедов Г.А., Исмайлов Р.Ш. Феноменологические уравнения гидромеханики двухфазных потеков с непрерывным изменением массы. Известия высших технических учебных заведений Азербайджана. Cild 19, № 6 (110), Bakı, ADNSU, 2017 с.55-65.

2. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика. Москва, Энергоиздат, 1984, 384 с.

3. Альтшуль А.Д. и др. Гидравлика и аэродинамика. Москва 1987, 414 с.

4. Mirzəcanzadə A.X. və b. Hidravlika. Bakı "Maarif" 1990, 280 s.

5. Рабинович Е.З. Гидравлика. Москва «Недра», 1980, 278 с.

6. Михалев М.А. Гидравлический расчет трубопроводов. Инженерный журнал, № 6, 2012. с. 20-28.