НЕФТНИ СУРИБ ЧИҚАРИШ ЖАРАЁНИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ДАСТУРИЙ ТАЪМИНОТИ

Бегулов О.У.

Бегулов Олмос Уктам ўғли – ассистент, Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги ТАТУ Қарши филиали Дастурий инжиниринг кафедраси. Қарши ш. Ўзбекистон Республикаси, e-mail: olmosbegulov@gmail.com *ORCID ID 0000-0003-4211-5159*

Аннотация: Мақолада нефтни суриб чиқариш жараёнини компютерда моделлаштириш муаммосига қўлланилган ҳолда икки фазали фильтрация масаласида тўйинганлик функцияси қийматларини аниқлаш сонли усул ёрдамида амалга ошириш баён этилган ва дастурий таъминот ишлаб чиқилган. Таклиф этилган алгоритмларнинг амалий қўллаш натижалари ҳам келтирилган.

Калит сўзлар: *икки фазали фильтрация, жараён, математик модел, босим, чекли айирмалар, ҳажмий тезлик, нефть бериш коэффициенти, Дарси қонуни.*

Abstract: The article describes the implementation of the oil pumping process using the finite method of determining the saturation function valuyes in the issuye of two-phase filtration, appliyed to the problem of computer modeling, and the software has beyen developed. The results of the practical application of the proposed algorithms are also pretsented.

Keywords: *Two-phase filtration, process, mathematic model, pressure, finite difference, oil recovery coyefficiyent, Darcy's law.*

В статье описана реализация процесса перекачки нефти с использованием конечного метода определения значений функции насыщения в задаче двухфазной фильтрации, примененного к задаче компьютерного моделирования, и разработано программное обеспечение. Также представлены результаты практического применения предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: Двухфазовая фильтрация, процесс, математическая модель, давление, конечная разность, коэффициент нефтеотдачи, закон Дарси.

Ҳозирги кунда мураккаб технологик жараёнларни компьютерда математик моделлаштириш усули билан ўрганиш замонавий ва истиқболли усул ҳисобланади. Шу жумладан, нефть ва газни қазиб олиш жараёнларини оптималлаштириш технологияларини назарий жиҳатдан асослашда ҳам компьютер ёрдамида математик моделлаштириш муҳим аҳамият касб этади. Бу усул ёрдамида конлар параметрларининг турли қийматларида кўп вариантли ҳисоблашлар ўтказилиб, жараённи мукаммал ўрганиш имкониятини берилади ва тадқиқотлар нисбатан кам ҳаражатли бўлади.

Мазкур мақолада икки фазали сизиш жараёнларини компютерда математик моделлаштириш усулида тадқиқ этишга мўлжалланган математик ва дастурли таъминот ишлаб чиқилган. Яратилган математик ва дастурли таъминот ёрдамида нефтни сув ёки бошқа суюқлик билан суриб чиқариш жараёнларини тадқиқ этиш имконияти пайдо бўлди.

I. Икки фазали фильтрация масаласининг қўйилиши ва математик модели. Иккита суюқликнинг биргаликдаги ҳаракатида фазалардаги босимлар P_1 ва P_2, умуман олганда, ўзаро тенг бўлмайди. Фазавий босимлар орасидаги фарқ капилляр босим функцияси деб аталувчи P_k функция билан тавсифланади[1-4]:

$$P_1 - P_2 = P_k(s)\ . \qquad (1)$$

Капилляр босим функцияси тажриба ўтказиш усули билан фазалар тўйинганликларининг функцияси кўринишида аниқланади, икки фазали фильтрация масалаларида

$$P_1 - P_2 = P_k(s) = \sqrt{m/k} \cdot \delta \cdot cos\theta \cdot J(s), \qquad (2)$$

бу ерда s – масалан, иккинчи, ҳайдовчи фаза тўйинганлиги функцияси, k – ғовак муҳитнинг ўтказувчанлик коэффициенти, θ – суюқлик ва жинс орасидаги статик чегаравий бурчак, δ – сирт таранглиги коэффициенти, $J(s)$ – тажриба ўтказиш усули билан аниқланадиган Леверетт функцияси.

Кўп фазали фильтрация масалаларида ҳар бир фазанинг ҳаракат тенгламаси сифатида бир жинсли суюқлик фильтрацияда аниқланган қуйидаги Дарси қонуни асос қилиб олинади:

$$W = -k/\mu \cdot (\partial p/\partial x - \rho g), \qquad (3)$$

бу ерда W, μ, p ва ρ – мос равишда, бир жинсли суюқликнинг ҳажмий тезлиги, қовушқоқлиги, босими ва зичлиги, k – ғовак муҳитнинг шу суюқликка нисбатан ўтказувчанлиги, x – фазовий ўзгарувчи, g - эркин тушиш тезланиши. Кўп фазали фильтрация жараёнларини математик моделлаштириш усули билан тадқиқ этишда (3) Дарси қонуни кўп фазали оқим учун у ёки бу кўринишда умумлаштирилади. Амалиётда кўп ишлатиладиган умумлаштиришлардан бири ушбу

$$W_i = -k_i/\mu_i \cdot (\partial p_i - \rho_i g), \quad i = 1{,}2, \qquad (4)$$

кўринишга эга, бу ерда W_i, μ_i, p_i ва ρ_i – мос равишда, i – фазанинг ҳажмий тезлиги, қовушқоқлиги, босими ва зичлиги, k_i – ғовак муҳитнинг i – фазага нисбатан ўтказувчанлиги, фазавий ўтказувчанлик функцияси дейилади. Одатда $f_i = k_i/k$ муносабат орқали f_i нисбий фазавий ўтказувчанлик функсийаси тушунчаси киритилади ва (4) ҳаракат тенгламаси

$$W_i = -k/\mu_i \cdot f_i \cdot (\partial p_i/\partial x - \rho_i g) \qquad (5)$$

кўринишга келади, бу ерда $0 \le f_i \le 1$, $i = 1{,}2$.

(3) Дарси қонуни кўп фазали оқим учун умумлаштирилишининг иккинчи ёндошувида i - фазанинг ҳаракат тенгламаси сифатида

$$W_i = -k/\mu_i \cdot (\partial p_i/\partial x - \rho_i g) - G_j, \qquad (6)$$

тенглама қабул қилинади, бу ерда $i, j = 1{,}2$; $j \ne i$, G_j – j–фазанинг ҳаракатчанлиги функцияси дейилади. G_j функция ғовак муҳитнинг бир қисми j–билан эгалланганлиги учун i–фазанинг ҳажмий тезлиги миқдор жиҳатдан камайишини акс эттиради.

(4) ҳаракат тенгламасидан фойдаланилганда нисбий фазавий ўтказувчанлик функцияси киритилгандек, (6) ҳаракат тенгламасидан фойдаланишганда $g_j = G_j/W$ муносабат орқали j – фазанинг нисбий фазавий ҳаракатчанлик функцияси тушунчасини киритиб, ҳаракат тенгламасини ушбу

$$W_i = -k/\mu_i \cdot (\partial p_i/\partial x - \rho_i g) - g_j \cdot W \qquad (7)$$

кўринишда ёзиб олиш мумкин, бу ерда W – икки фазали суюқликнинг жами ҳажмий тезлиги, $i, j = 1{,}2$, $j \ne i$. $W = W_1 + W_2$ муносабатни ҳисобга олган ҳолда, (7) ҳаракат тенгламаларини фазавий ҳажмий тезликлар W_1 ва W_2 га нисбатан тенгламалар системаси деб қараб, уни W_1 ва W_2 ларга нисбатан ечиб олсак, ҳаракат тенгламалари системаси ушбу

$$W_1 = -((1+g_1)/(1+g_1+g_2)) \cdot k/\mu_1 \cdot (\partial p_1/\partial x - \rho_1 g) + (g_2/(1+g_1+g_2)) \cdot k/\mu_2 \cdot (\partial p_2/\partial x - \rho_2 g) \qquad (8)$$

$$W_2 = (g_1/(1+g_1+g_2)) \cdot k/\mu_1 \cdot (\partial p_1/\partial x - \rho_1 g) - ((1+g_2)/(1+g_1+g_2)) \cdot k/\mu_2 \cdot (\partial p_2/\partial x - \rho_2 g)$$

кўринишни олади.

(4) ҳаракат тенгламасида фазавий ўтказувчанлик k_i, $i = 1{,}2$ функциялари ёки (5) ҳаракат тенгламасида нисбий фазавий ўтказувчанлик f_i, $i = 1{,}2$ функциялари тажрибалардан аниқланиши каби, (6) ҳаракат тенгламасидаги фазавий ҳаракатчанлик G_i, $i = 1{,}2$ функциялари ёки (7) ҳаракат тенгламасидаги нисбий фазавий ҳаракатчанлик g_i, $i = 1{,}2$ функцияларини ўша тажриба натижаларидан аниқлаш мумкин. Мақолада нисбий фазавий ҳаракатчанлик $g_1(s)$ ва $g_2(s)$ функцияларини нисбий фазавий ўтказувчанлик $f_1(s)$ ва $f_2(s)$ функциялари орқали

$$g_1(s) = \mu_0 \cdot [1 - f_2(s)]/[f_1(s) + \mu_0 \cdot f_2(s)], \qquad (9)$$
$$g_2(s) = [1 - f_1(s)]/[f_1(s) + \mu_0 \cdot f_2(s)]$$

кўринишдаги ифодалаш мумкинлиги кўрсатилган.

Шунга эътибор қаратиш лозимки, (8) ҳаракат тенгламаларида ҳар бир i–фазага "ўзининг босими" градиенти $\partial p_i/\partial x < 0, i = 1,2$ илгари ҳаракатлантирувчи таъсир этади, бошқа фазанинг градиенти $\partial p_j/\partial x < 0,\ \ j = 1,2, j \neq i$ эса тескари ҳаракатланувчи таъсир этади. Бу ҳолат (8) ҳаракат тенгламалари икки фазали фильтрация жараёнининг механик мазмунига мос келишини кўрсатади.

Фазавий босимлар p_1 ва p_2 орасидаги (1) муносабатдан фойдаланиб, (8) ҳаракат тенгламаларини

$W_1 = [1 + g_1(s) - \mu_0 \cdot f_2(s)]/(1 + \mu_0) \cdot W - k/(\mu_1 + \mu_2) \cdot p_k'(s) \cdot \partial s/\partial x - b(s) \cdot g W_2 = \{\mu_0 \cdot [1 + g_2(s)] - g_1(s)\}/(1 + \mu_0) \cdot W + k/(\mu_1 + \mu_2) \cdot p_k'(s) \cdot \partial s/\partial x + b(s) \cdot g$ (10)

кўринишда ёзиб олиш мумкин. Бу ерда

$$W = -(k/\mu_1 + k/\mu_2)/\omega(s) \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x} - (k/\mu_1)/\omega(s) \cdot \frac{\partial p_k(x)}{\partial x}, \qquad (11)$$

Кўп фазали фильтрация жараёнларининг математик моделларини қуришда, хусусан икки фазали фильтрация жараёнида фазаларнинг ҳаракат тенгламалари билан бир қаторда ҳар бир i–фазанинг массаси сақланиши қонуни дастлабки муносабатлар ҳисобланади

$$\begin{cases} m \cdot \partial s_1/\partial t + \partial W_1/\partial x = 0, \\ m \cdot \partial s_2/\partial t + \partial W_2/\partial x = 0 \end{cases} \qquad (12)$$

(1) муносабат ўринли бўлганлиги сабабли, (12) система тенгламалари ҳадма – ҳад қўшилса, $\partial(W_1 + W_2)/\partial x = 0$ ёки $\partial W/\partial x = 0$ ёки $\partial[(k/\mu_1 + k/\mu_1)/W_2 \cdot \partial p_2/\partial x + (k/\mu_1)/W_2 \cdot \partial p_k(s)/\partial x - d_2(s) \cdot g] = 0.$ (13)
муносабат келиб чиқади. (13) – муносабат иккинчи фаза босими p_2 функцияга нисбатан тенглама деб қабул қилинади.

(10) системанинг иккинчи тенгламасига W_2 фазавий ҳажмли тезлигининг (10) ифодасини қўйиб, иккинчи фазанинг $s_2(x,t) = s(x,t)$ тўйинганлик функциясига нисбатан

$$m \cdot \partial s/\partial t + \partial[\varphi(s) \cdot W]/\partial x = \partial[a(s) \cdot \partial s/\partial x + b(s)\, g]/\partial x = 0 \qquad (14)$$

тенглама ҳосил бўлади.

Шундай қилиб, икки фазали фильтрация жараёнларининг математик моделида номаълум функциялар сифатида иккинчи фазанинг босими $p_2(x,t)$ ва тўйинганлиги $s(x,t)$ функциялари қабул қилинса, бу функцияларга нисбатан (13) - (14) тенгламалар системаси ҳосил бўлади.

II. Номаълум тўйинганлик функцияси учун чегаравий шартларни шакллантириш. Фараз қилайлик, $x = 0$ нуқтада $\Gamma_{ҳ}$ ҳайдовчи қудуқ, $x = L$ нуқтада эса $\Gamma_{ф}$ нефть берувчи (ёки фойдаланувчи) қудуқ жойлашган бўлсин. Ҳайдовчи қудуқда фақат (нефт берувчи қатламдан нефт фазани суриб чиқарувчи) сув фазаси ҳайдалаётган бўлсин ва бу фазанинг ҳажмий тезлиги W га тенг бўлсин. Бу физикавий шартнинг математик ифодаси (8) ҳаракат тенгламаси асосида шакллантирилади [3-4]:

$$W_2\big|_{\Gamma_{ҳ}} = [\varphi(s) \cdot W - a(s) \cdot \partial s/\partial x + b(s) \cdot g]\big|_{\Gamma_{ҳ}} = W. \qquad (15)$$

Бу ерда $\varphi(s)$, $a(s)$, ва $b(s)$ функциялар (13), (14) формулалар билан аниқланган. (15) муносабатдан $s(x,t)$ функция учун $x = 0$ нуқтада (ҳайдовчи қудуқда) қўйиладиган чегаравий шарт аниқланади:

$$[\varphi(s) \cdot W - a(s) \cdot \partial s/\partial x + b(s) \cdot g]\big|_{\Gamma_{ҳ}} = W \qquad (16)$$

ёки

$$(\partial s/\partial x)\big|_{x=0} = [-[1 - \varphi(s)] \cdot W/a(s) + b(s)/a(s) \cdot g]\big|_{x=0} \qquad (17)$$

Чегаравий шарт ушбу

$$W_2\big|_{x=L} = [\varphi(s) \cdot W - a(s) \cdot \partial s\ /\ \partial x + b(s) \cdot g]\big|_{x=L} = g_2(s)/[g_1(s) + g_2(s) \cdot W]\big|_{x=L} \qquad (18)$$

кўринишга келади ва

$$[\varphi(s) \cdot W - a(s) \cdot \partial s\ /\ \partial x + b(s) \cdot g]\big|_{x=L} = g_2(s)/[g_1(s) + g_2(s) \cdot W]\big|_{x=L} \qquad (19)$$

шартни изланаётган $s(x,t)$ тўйинганлик функцияси учун $x = L$ нуқтадаги чегаравий шарт деб қараш мумкин ва уни ушбу

$$(\partial s/\partial x)\big|_{x=L} = \{\varphi(s) - g_2(s)/[g_1(s) + g_2(s)]\}/a(s)\cdot W + b(s)/a(s)\cdot g\big|_{x=L} \qquad (20)$$

кўринишга келтирса бўлади.

III. Нефтни суриб чиқариш жараёнларининг математик моделларини сонли амалга ошириш усуллари ва алгоритимлари. Тўйинганлик функцияси $s(x,t)$ нинг тақсимоти ушбу (14) тенглама билан тавсифланади.

(14) тенгламанинг ечими

$$D = \{0 \le x \le L;\ 0 \le t \le T\} \qquad (21)$$

соҳада изланади.

Параболик типдаги (14) тенглама учун бошланғич шарт қўйилади,

$$s(x,0) = \psi_0(x), \qquad (22)$$

бу ерда $\psi_0(x)$ – берилган функция. Изланаётган $s(x,t)$ тўйинганлик функцияси учун D соҳанинг чап чегарасида ($x = 0$) (15) шарт қўйилган.

(14) дифференциал тенгламада хусусий ҳосилаларни чекли айирмалар нисбати билан алмаштирилиб, (14) дифференциал тенгламани аппроксимацияловчи чекли айирмали тенгламани ҳосил қиламиз:

$$m\cdot\frac{s_i^{j+1}-s_i^j}{\Delta t} + W\cdot\frac{\varphi^j_{i+1/2}-\varphi^j_{i-1/2}}{\Delta x} =$$
$$= \left[a^j_{i+1/2}\cdot(s^j_{i+1}-s^j_i)/\Delta x - a^j_{i-1/2}\cdot(s^j_i - s^j_{i-1})/\Delta x\right]/\Delta x + +b^j_i\cdot g, \qquad (23)$$

бу ерда $j = 0,1,\dots,M-1$; $i = 1,2,\dots,N-1$.

Агар номаълум $s(x,t)$ функциянинг қийматлари j –қатлам тугунларида берилган бўлса ёки аниқланган бўлса, (23) тенгламадан фойдаланиб бу функциянинг (j+1)–қатламдаги тугунларда ҳисобласа бўлади. Ҳақиқатан, (23) тенгламани ушбу

$$s_i^{j+1} = s_i^j - \frac{W}{m}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot\left(\varphi^j_{i+1/2} - \varphi^j_{i-1/2}\right) + \qquad (24)$$
$$+\frac{\Delta t}{m}\cdot\left[a^j_{i+1/2}\cdot(s^j_{i+1}-s^j_i)/\Delta x - a^j_{i-1/2}\cdot(s^j_i - s^j_{i-1})/\Delta x\right]/\Delta x + \frac{\Delta t}{m}\cdot b^j_i\cdot g$$

кўринишда ёзиб олинса, бу (24) муносабат s_i^{j+1} қийматни ҳисоблаш алгоритимини беради, $j = 0,1,\dots,M-1$; $i = 1,2,\dots,N-1$.

(24) формула орқали $s(x,t)$ функциянинг қийматларини исталган вақт моментида тугунларда ҳисоблаш мумкин.

Чап чегаравий шарт асосида s_0^{j+1} ни қуйидаги кўринишда аниқланади:

$$s_0^{j+1} = s_0^j + \frac{2}{m}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot\left[\left(1-\varphi^j_{1/2}\right)\cdot W + a^j_{1/2}\cdot(s^j_1 - s^j_0)/\Delta x\right],\ j = 0,1,\dots,M-1 \qquad (25)$$

Ўнг чегаравий шарт асосида s_N^{j+1} ни қуйидаги кўринишда аниқланади:

$$s_N^{j+1} = s_N^j - \frac{2}{m}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot\left\{\left[g_2(s_N^j)/[g_1(s_N^j) + g_2(s_N^j)] - \varphi\left(s^j_{N-1/2}\right)\right]\cdot W - a(s^j_{N-1/2})\cdot\right.$$
$$\left.(s^j_N - s^j_{N-1})/\Delta x\right\}, \qquad (26)$$

IV. Жараённи ҳисоблаш дастурий таъминоти ва ҳисоблаш натижалари таҳлили. $S_н(x,t)$ ва $S_c(x,t)$ функциялар қийматларини тўр тугунларида ҳисоблаш дастури 1-расмда келтирилган. Бу дастурдан ҳам кўриниб турибдики, мазкур масалани компютерда ечиш дастури модуллардан ташкил топган. $f_N(S_s)$, $f_S(S_s)$, $g_1(S_s)$, $g_2(S_s)$, $\varphi(S_s)$, $J(S_s)$, $J'(S_s)$, $P_k(S_s)$, $P'_k(S_s)$ ва $a(S_s)$ функцияларнинг қийматларини ҳисоблаш ишлари тегишли модуллар - ностандарт функциялар томонидан бажарилади. С++ Буилдер 6 муҳитида тузилган дастурли таъминотда нефт ва газ қатлами параметрлари (m-ғоваклик коэффициенти, *k*- ўтказувчанлик коэффициенти), фазалар параметрлари (μ_n, μ_s -динамик қовушқоқлик) бошланғич параметрлар сифатида аниқланган [2]. Уларнинг қийматларини осон ўзгартириб, кўп вариантли ҳисоблашларни ўтказиш мумкин.

1-жадвал

Ҳисоблаш натижалари

X	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t=200	0,654	0,646	0,639	0,632	0,625	0,618	0,612	0,606	0,602	0,598
t=400	0,669	0,663	0,658	0,653	0,649	0,644	0,640	0,636	0,634	0,632
t=800	0,683	0,680	0,676	0,673	0,671	0,668	0,667	0,664	0,662	0,661

Компьютерда ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари С++ Буилдер 6 муҳитида ишлаб чиқилган дастурнинг ишлай олишини намойиш этди. Ҳисоблаш тажрибалари натижалари ғовак муҳитда икки фазали фильтрация жараёнларнинг у ёки бу математик модели доирасида компьютерда моделлаштиришга мўлжалланган дастурий таъминотни ишлаб чиқишда С++ дастурлаш тилини амалий қўлланишини кўрсатди.

V. Хулоса. Бир ўлчовли нефтни суриб чиқариш жараёнини компьютерда моделлаштириш бўйича ҳисоблаш тажрибаларининг натижалари нефтни суриб чиқариш бўйича табиий тажрибаларнинг маълум натижаларига мос келади, бу эса кўриб чиқилган математик модел, усул, алгоритмлар, компьютерда нефтни суриб чиқариш жараёнларини моделлаштириш ва технологик кўрсаткичларни башорат қилиш учун ишлаб чиқилган дастурий таъминот қўлланиши мумкин деган хулоса қилишга имкон беради

АДАБИЁТЛАР

1. Коновалов А.Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1988. – 166 с.
2. Соммервилл, Иан. Инженерия программного обеспечения, 6-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2002. – 624с.: ил.- Парал. тит. анг.
3. Узаков З.У. Об одной математической модели фильтрации многофазной несжимаемой жидкости в пористой среде. – «Динамика неоднородной жидкости» (Динамика сплошной среды 44), Институт гидродинамики, 1980 г., вып. 44, Новосибирск. С. 127-138.
4. Узаков З.У., Кипчаков А.Х., Узакова Д.З. Математическое моделирование процессов двухфазной фильтрации. В сборнике Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2014». Самарканд, 15-17 сентября 2014 г. Том №1, с.150-152.