

ЕКІ ФАЗАЛЫ АҒЫС

Көп фазалы ағыс

Көп фазалы ағыстар мынадай жағдайларда орын алады:

- 1) Мұнай өндірісінде – кеуекті ортада мұнай, су және газдың бірге ағуы;
- 2) Грунтты зертеулерде – қанықпаған ортада ылғалдылықтың таралуы (су мен ауаның бірігіп ағуы);
- 3) Грунттағы сулардың гидрогеологиясында – мұхит аралдарының астында тұзды судың тұщы суға енуі.

Дарси заңы

$$u = -\frac{k}{\mu}(\operatorname{grad} p - \rho g) \quad (1)$$

$$-m \frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div}(\rho u) \quad (2)$$

$$\rho = \rho(p) \quad (3)$$

Бұл үш теңдеу шекаралық шартпен бірге алғанда бір фазалы ағысты зерттеуге қажетті және жеткілікті болып табылады.

Бұл шарт екі не көп фазалы жағдайға да қарапайым тәсілмен жалпыланады.

Фазаларды сәйкесінше 1 және 2 индекстері арқылы белгілеп, төмендегі теңдеулерді аламыз

$$u_2 = -k \frac{k_2}{\mu_2} (\text{grad} p_2 - \rho_2 g) \quad (4) \quad \rho_1 = \rho_1(p) \quad (8)$$

$$u_1 = -k \frac{k_1}{\mu_1} (\text{grad} p_1 - \rho_1 g) \quad (5) \quad \rho_2 = \rho_2(p) \quad (9)$$

$$m \frac{\partial(\rho_1 S_1)}{\partial t} = - \text{div}(\rho_1 u_1) \quad (6) \quad S_1 + S_2 = 1 \quad (10)$$

$$m \frac{\partial(\rho_2 S_2)}{\partial t} = - \text{div}(\rho_2 u_2) \quad (7) \quad p_2 - p_1 = p_c(s_1) \quad (11)$$

k - жалпы өткізгіштік, $k_{1,2}$ - салыстырмалы өткізгіштік (жалпы өткізгіштіктегі үлесі), S – қанықтылық, m – кеуектілік, p_c - капиллярлы қысым.

Кеуекті ортадағы бірнеше сұйықтардың бірге ағуын қарастырғанда салыстырмалы кеуектілік түсінігі маңызды рөл ойнайды. Алайда салыстырмалы кеуектіліктің қанықтылықтан тәуелділігін анықтау бір қарағандағыдай оңай емес.

Салыстырмалы өткізгіштікті өлшеу

Метод	Надежность результатов	Время работы, час/образец, $k = 10^{-9} \text{ с.м}^2$	Степень сложности метода	Замечания
Штата Пенсильвания Хасслера	Прекрасная	8	Сложный	Используются три образца Требуются манометры очень малого объема вытеснения
	»	40	Очень сложный	
Однообразцовый динамический	Сомнительная для коротких образцов	6	Простой	Для коротких образцов относительная проницаемость для смачивающей фазы слишком высока
Стационарный жидкостной	Сомнительная при низкой газонасыщенности	4	»	Применим только для измерения относительной проницаемости для газа
Прокачивания газа	Хорошая	2	Очень простой	Можно работать с минимальной степенью обучения и требуется минимальное количество оборудования
Хаффорда	Прекрасная	7	Простой	Предпочтительнее чем дисперсионное нагнетание
Дисперсионное нагнетание	»	7	Простой	

Бір сұйықты екінші сұйықпен ығыстыру Бакли-Левверет теңдеуі

Кеуекті ортадан бір сұйықты екінші сұйықпен ығыстыру мұнай өндірісінде басты рөл ойнайды. Сығылмайтын араласпайтын сұйықтардың бір өлшемді ағысы кезінде, фазалар арасындағы беттік керілу үлкен болмаса және капиллярлық қысымның, ауырлық күшінің әсерін ескермеуге болса, ығыстыру процессі қарапайым математикалық сипатқа ие болады.

Әуелі кеуекті ортамен толтырылған, түзусызықты кішкентай түтікшеде болатын ығысу процессін қарастырайық. Және бұл түтікше горизонтқа α бұрыш жасап көлбесін.

Ох осі түтікше бойымен бағытталсын. Қысым мен қанықтылық барлық қимада тұрақты деп есептеу үшін түтікшенің көлденең қимасының ауданы A – ны айтарлықтай кішкентай деп алайық. Дарси заңы бойынша ылғалдайтын және ылғалдамайтын фазалар үшін келесі теңдеулерді жазамыз

$$q_{с.} = - \frac{K_{с.} A}{\mu_{с.}} \left[\frac{\partial p_{с.}}{\partial x} + \rho_{с.} g \sin \alpha \right], \quad (12)$$

$$q_{не.} = - \frac{K_{не.} A}{\mu_{не.}} \left[\frac{\partial p_{не.}}{\partial x} + \rho_{не.} g \sin \alpha \right], \quad (13)$$

$$p_{не.} = p_{с.} = p_{к.} \quad (14)$$

Сұйықтар сығылмайтын деп қарастырылады. Сәйкесінше үзіліссіздік теңдеуі

$$\frac{\partial q_{с.}}{\partial x} = -mA \frac{\partial S_{с.}}{\partial t}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial q_{нс.}}{\partial x} = -mA \frac{\partial S_{нс.}}{\partial t}, \quad (16)$$

Мұндағы:

$$S_{с.} + S_{нс.} = 1. \quad (17)$$

(15) және (16) теңдеулерін қосып (17) – ні ескеріп келесі қатынасты аламыз:

$$\frac{\partial}{\partial x} (q_{с.} + q_{нс.}) = 0, \quad (18)$$

Толық көлемдік шығын құбыр бойында тұрақты болып қалады:

$$q = q_{с.} + q_{нс.} \quad (19)$$

Осы нәтижелерді пайдаланып, Ылғалдайтын сұйықтың салыстырмалы шығынын анықтауға болады:

$$f_{c.} = \frac{q_{c.}}{q} \quad (20)$$

Ылғалдамайтын сұйықтың салыстырмалы шығыны:

$$f_{нс.} = \frac{q_{нс.}}{q} = 1 - f_{c.} \quad (21)$$

(20) және (21) – ді ескеріп үзіліссіздік теңдеуі келесі түрде жазылады

$$\frac{q}{mA} \frac{\partial f_{c.}}{\partial x} = - \frac{\partial S_{c.}}{\partial t}, \quad (22)$$

$$\frac{q}{mA} \frac{\partial f_{нс.}}{\partial x} = - \frac{\partial S_{нс.}}{\partial t}. \quad (23)$$

(12), (13) және (14) теңдеулерінен ρ_c және ρ_{nc} қысымдарын жойып келесі өрнекті аламыз:

$$q_{nc} = - \frac{K_{nc}}{\rho_{nc}} A \left[- \frac{\rho_c q_c}{K_c A} + \frac{\partial \rho_k}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right], \quad (24)$$

$$\Delta \rho = \rho_c - \rho_{nc}. \quad (25)$$

Мына шамаларды

$$q_c = f_c q \quad (26)$$

$$q_c = (1 - f_{nc}) q \quad (27)$$

осы теңдеуге қойып келесі теңдеуді аламыз:

$$f_c = \frac{1 + (K_{nc} A / \rho_{nc} q) [(\partial \rho_k / \partial x) - \Delta \rho g \sin \alpha]}{1 + (K_{nc} \rho_c / K_c \rho_{nc})}. \quad (28)$$

Егер толық шығын шамасы q өте үлкен болса және (немесе) беттік керілу мен қысымдар айырмашылығы өте аз болса, онда жуық теңдеуді жазуға болады

$$f_c \approx \left(1 + \frac{K_{nc} \nu_c}{K_c \mu_{nc}} \right)^{-1} = f_c \left(S_c, \frac{\mu_c}{\mu_{nc}} \right), \quad (29)$$

f_c - шамасы тек S_c қанықтылықтан және μ_c/μ_{nc} параметрлерінен тәуелді.

$$\frac{\partial f_c}{\partial x} = \frac{df_c}{dS_c} \frac{\partial S_c}{\partial x}. \quad (30)$$

Ылғалдайтын сұйық үшін үзіліссіздік теңдеуі сонда мына түрде жазылады:

$$\left[\frac{q}{mA} \frac{df_c}{dS_c} \right] \frac{\partial S_c}{\partial x} = - \frac{\partial S_c}{\partial t}. \quad (31)$$

Уақыт бойынша толық туынды:

$$\frac{dS_{c.}}{dt} = \frac{\partial S_{c.}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial S_{c.}}{\partial t}. \quad (32)$$

Егер $x = x(t)$ жазықтықтың қозғалыс заңы болса, ол жазықтықта $S_{c.}(x,t)$ қанықтылығы тұрақты мәнге ие болса, онда осы жазықтықта

$$\frac{dS_{c.}}{dt} = 0 \quad (33)$$

Сәйкесінше оның қозғалыс жылдамдығы

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{S_{c.}} = - \frac{\partial S_{c.}}{\partial t} \left(\frac{\partial S_{c.}}{\partial x} \right)^{-1}. \quad (34)$$

(31) бен (34) тен:

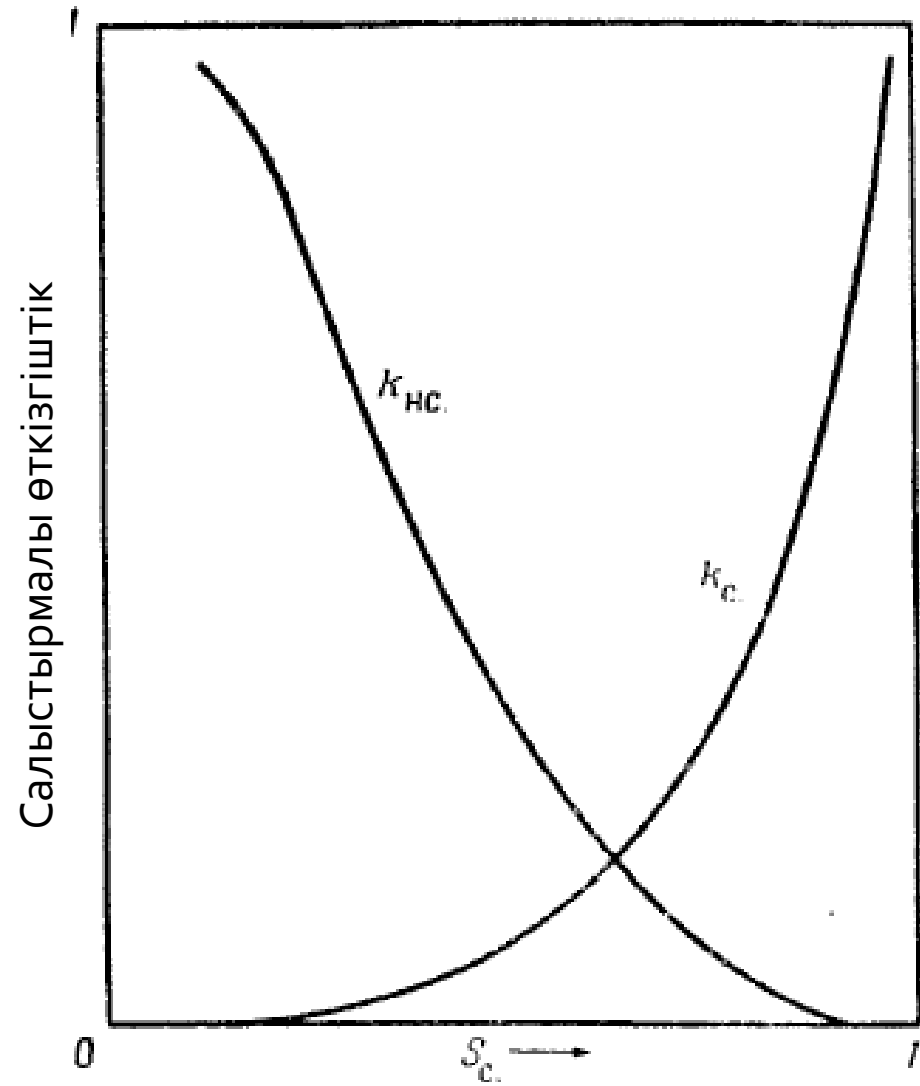
$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{S_{c.}} = \frac{q}{mA} \frac{df_{c.}(S_{c.})}{dS_{c.}}. \quad (35)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{S_c} = \frac{q}{mA} \frac{df_c(S_c)}{dS_c}. \quad (36)$$

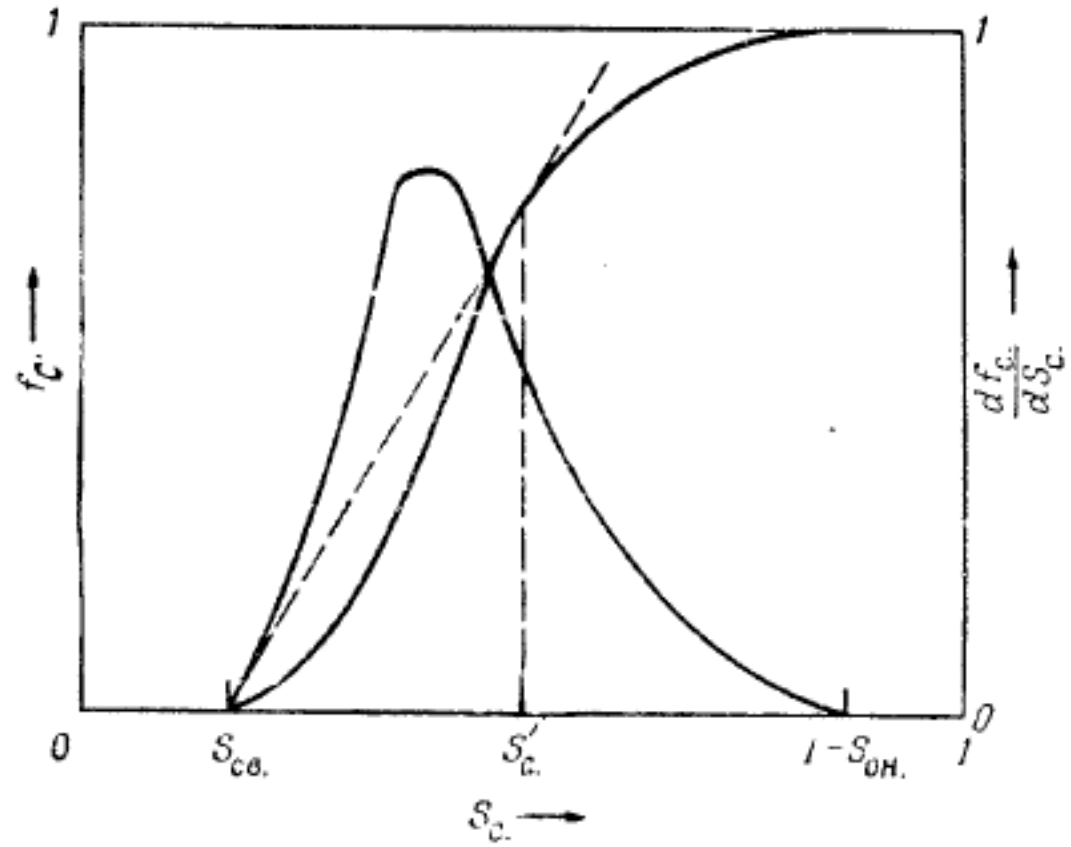
Бұл теңдеу Бакли-Леврет теңдеуі деп аталады. Оны t бойынша интегралдасақ

$$x_{S_c}(t) - x_{S_c}(0) = \frac{Q(t) - Q(0)}{mA} \frac{df_c(S_c)}{dS_c}. \quad (37)$$

$x_{S_c}(t)$ және $x_{S_c}(0)$ сәйкесінше $t=t$ және $t=0$ уақытындағы қарастырылып отырған ($S_c(x,t)$ қанықтылығы тұрақты болатын) жазықтықтың координаталары. $Q(t)$ және $Q(0)$ сәйкесінше $t=t$ және $t=0$ уақытындағы образецке келген толық сұйық көлемі.



Салыстырмалы өткізгіштіктердің қисықтары

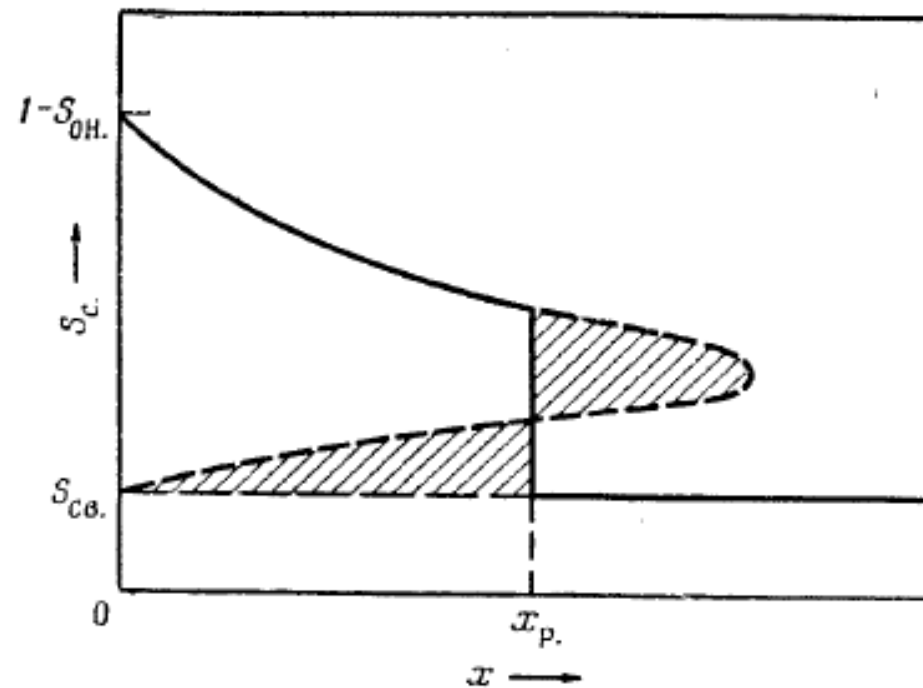


Сұйықтың жалпы ағынындағы ылғалдандыратын сұйық үлесінің ортаның ылғалдандыратын сұйықтықпен қанығуына тәуелділігі. Функцияның бірінші туындысы да осы жерде бейнеленген және ығысу фронтында қанығудың қалай анықталатыны көрсетілген.

Қанықтылықтың бастапқы таралуы мына интервалда жатады

$$S_{св.} < S_{с.} < 1$$

Және $t=0$ уақытында $x=0$ қимасында орналасады. (6.35) теңдеуге сәйкес $t>0$ уақытында оның таралуы 6.4 суретіндегідей болады.



Бакли-Левретт теңдеуінен туындайтын түзу сызықты ығыстыру процесіндегі қанықтылықтың таралуы. Материалдық баланс теңдеуінен туындайтын үзілістің орны көрсетілген.

Суреттен байқалатындай процесс басталғаннан кейін белгілі бір уақыт өткенде образецтегі қанықтылықтың таралуы кей жерлерде бірімәнді емес, бұл физикалық тұрғыдан мүмкін емес. Осы бірімәнді емес болуын жою үшін бастапқы $t=0$ уақытында ылғалдаушы сұйықтың қанықтылығы S_c барлық жерде $S_{св.}$ – ға тең деп аламыз, және $t \geq 0$ уақытында $x=0$ қимасына тек ылғалдайтын сұйық келеді деп қарастырамыз. Яғни, $x=0$ де $f_c=1$. Сондықтан ылғалдайтын сұйық үшін

$$Q(t) = \int_0^{x_p} m (S_c - S_{св.}) A dx. \quad (38)$$

x_p - үзіліс нүктесі, оның оң жағында қанықтылық $S_{св.}$ – ға тең.

(6.36) теңдеуін интегралдап

$$Q = mA x_p. (S'_{c.} - S_{cb.}) - \int_{1-S_{OH.}}^{S_{c.}} mA x S_{c.} dS_{c.}, \quad (39)$$

$S'_{c.}$ - ең үлкен қанықтылық. $Q(0)=0$ және $x_{S_c}(0)=0$ болғанда (36) теңдеуінен

$$Q = mA (S'_{c.} - S_{cb.}) x_p. - Q \int_{1-S_{OH.}}^{S'_{c.}} \frac{df_{c.}}{dS_{c.}} dS_{c.}, \quad (40)$$

Осы теңдеуді $f_{c.}=1$ және $S_{c.}=1 - S_{OH.}$ болғанда интегралдап

$$Q = mA (S'_{c.} - S_{cв.}) x_p. - Q [f_{c.} (S'_{c.}) - 1], \quad (41)$$

Бұдан

$$mA x_p. = \frac{f_{c.} (S'_{c.})}{S'_{c.} - S_{cв.}} Q. \quad (42)$$

(36) теңдеуін $Q(0)$ және $x(0)$ шарттарын пайдаланып

$$mA x_p. = Q \frac{df_{c.}}{dS_{c.}} (S'_{c.}) \quad (43)$$

Сәйкесінше

$$\frac{df_{c.} (S'_{c.})}{dS_{c.}} = \frac{f_{c.} (S'_{c.})}{S'_{c.} - S_{cв.}}. \quad (44)$$

Осы теңдеуден S'_c -тан кіші болатын барлық мәндерді ескермесек қанықтылықтың таралуы бірімәнді болатынын көреміз. Анализ штрихталған облыстар ауданы тең екендігін көрсетеді.

Осы талданған ығыстыру процессінің схемасы мұнай өндірісінде кеңінен қолданылады. Бұл схеманы әртүрлі әдістермен жалпылауға, толықтарулар енгізуге болады. Мысалы, дәл осы анализ горизанталды осьтік симметриялы ағыс үшін жарамды. Бұл жағдайда (36) теңдеуінің орнына келесі теңдеуді қолданады

$$\pi h [r_{S_c}^2(t) - r_{S_c}^2(0)] = [Q(t) - Q(0)] \frac{df_c(S_c)}{dS_c}. \quad (45)$$

Мұндағы $r_{S_c}^2$ -бетінде S_c тұрақты болатын радиус цилиндрі

$S_c = 1 - S_{OH}$ қанықтылығы үлгі бойынша таралмайтынын байқаймыз. Сондықтан, үлгіде барлық жерде $S_c < 1 - S_{OH}$. Бұл күтілетін нәтиже еді, өйткені S_{OH} (мұнайдың қалдық қанықтығы) критикалық мәнге жеткенде K_{HC} өткізгіштігі нөлге жетеді.

Барлық практикалық мақсаттар үшін салыстырмалы өткізгіштік қисықтары сұйықтықтардың табиғатына тәуелді емес деп санауға болады, бірақ бұл қалдық қанықтылыққа қатысты емес. Қалдық қанықтылық тек кеуекті ортаның қасиеттеріне тәуелді емес. Бірқатар тәжірибелерде сұйықтықтар арасындағы беттік керілудің төмендеуі ылғалдамайтын сұйықтың қалдық қанықтылығының төмендеуіне әкелуі мүмкін екендігі көрсетілген.