

UO'K: 622.276.6:519.876.5

KARBONAT KOLLEKTORLARDA KISLOTALI ISHLOV BERISH SAMARADORLIGINI QUDUQ ATROFI ZONASINING GEOLOGIK TUZILISHI BILAN UYG'UN MODELLASHTIRISH

Axatova Guliza Anvar qizi

Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston

Samatov Sherzod Shavkatovich

Iqtisodiyot va pedagogika universiteti, O'zbekiston

Jo'rayeva Gulnoza Cho'tmurodovna

Kasbi sanoat xizmat ko'rsatish texnikumi, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada karbonat kollektorlarda kislotali ishlov berish (KIB) samaradorligi quduq atrofi zonasining geologik tuzilishi bilan uyg'un nazariy modellashtirish asosida tahlil qilinadi. Litologik-tipologik xususiyatlar (ohaktosh/dolomit, g'ovaklik–o'tkazuvchanlik, yoriq va kaverno tuzilmalar) KIB parametrlari (HCl, kislota hajmi, in'ektsiya tezligi, bosqichma-bosqich berish, SFM/gel) bilan bog'lanadi. Integratsiyalashgan konsepsiya "geologiya - KIB - skin-faktor - mahsuldorlik indeksi" zanjiri orqali loyihalashni optimallashtirishga nazariy asos beradi.

Kalit so'zlar. karbonat kollektor; quduq atrofi zonasi; KIB; gorizont; g'ovaklik; o'tkazuvchanlik; tabiiy yoriq; kaverno tuzilma; Damköhler soni; chervotochina (wormhole); skin-faktor; mahsuldorlik indeksi; SFM; gel-diverter.

KIRISH. Karbonat konlari neft-gaz sanoatida muhim ahamiyatga ega bo'lib, ularning ishlab chiqarish samaradorligini oshirish uchun kislotali ishlov berish keng qo'llaniladi. Kislotali ishlov berish (acidizing) qavat yuzasidagi zahiralangan va qazish jarayonidagi shu'ba yoki loy kabi zararli bo'laklarni eritib, toshni eriydigan kanallar – "wormhole" lar hosil qiladi. Ushbu jarayon natijasida quduq atrofi zonasining permeabilitesi ortadi va mahsuldorlik indeksi oshadi.

Yaqin o'tkazilgan ilmiy tadqiqotlar (2015-yildan keyingi) karbonat kollektorlarda kislotali ishlov berish samaradorligini turli yo'llar bilan o'rganmoqda. Mazkur maqolada quyidagi jihatlar yoritiladi: (1) karbonat kollektorlarda asosiy geologik-morfologik xususiyatlar; (2) kislotali ishlov berish nazariyasi, jumladan qavat bilan o'zaro ta'sir va reaksiya kinetikasi, Damköhler soni va wormholelarning hosil bo'lish shartlari; (3) quduq atrofi zonasining filtratsion-geometrik tuzilishini modellashtirish tamoyillari, ya'ni skin-faktor va mahsuldorlik indeksi orqali samaradorlikni baholash; (4) integratsiyalashgan modellashtirish yondashuvi – qatlam litotipi va KIB parametrlaridan tortib skin-faktor va oqimga qadar; (5) amaliy modellashtirish

yondashuvlari – empirik, yarim-analitik va geometriyaga bog‘langan modellarning taqqoslanishi.

Karbonat kollektorlarning geologik-morfologik xususiyatlari. Karbonat kollektorlarda karbonat toshli litologiyalar (limeston, dolomit va mikritli karbonatlar) keng tarqalgan. Ularning porozitasi va permeabilitasi asosan depositional qatlami va keyingi diagenез jarayonlari ta’sirida shakllanadi. Diagenез jarayonlari (masalan, eritish yoki sementatsiya) bo‘shliq tarmog‘ini tubdan o‘zgartiradi: eritish bo‘shliqlar hajmini oshirib, kanal va kavernoз tuzilmalar (moldik, vug bo‘shliqlar) hosil qilsa, sementatsiya aksincha bo‘shliqlarni to‘ldirib ularni biriktiradi. Natijada karbonat konlar ancha geterogen xususiyatlarga ega bo‘lib, ba’zi zonalarida keng o‘lchamli karst teshiklar va yoriqlar rivojlangan bo‘lsa, boshqalarida faqat nanometr darajasida intergranulyar bo‘shliqlar mavjud bo‘lishi mumkin.

– **Litologik tiplar va bo‘shliqlar:** Masalan, zich sementlangan wackestone/packstone toshlarida faqat nanometr o‘lchamdagi intergranulyar bo‘shliqlar va stilolitlar qoladi, bu esa juda past poroziteli-permeabli tizimga sabab bo‘ladi. Aksincha, post-depositson eritish ostida qolgan karbonatlarda moldik va vug bo‘shliqlar rivojlanib, yaxshi rezervoar xossalari paydo bo‘ladi. Shuningdek, tabiiy yoriqlar (katakchalar) ham karbonat toshlarda uchraydi: masalan, Baýýasun, Kirkuk kabilarda qandaydir bo‘g‘imlangan bo‘lsada, ochiq yoriqli zonalar 2–3 tartibga oshirilgan permeabilitni beradi. [1]

– **Kavernoз va katakchali tuzilmalar:** Bo‘sh joylarni yanada kengaytirgan karst eritmalari tufayli karbonatlarda kamdan-kam bo‘lsa-da katta bo‘shliqlar (kavernalar) ham hosil bo‘ladi. Bunday bo‘shliqlar ba’zan yoriq tarmoqlari bilan bog‘lanib, butunlay kavernoз struktura tashkil qiladi va kollektorda qidirilmagan keng oqim yo‘llarini yaratadi. [2]

– **Sementatsiya va diaqenez:** Qattiq bosim ostida tortish va karbonatlarning yangi minerallarga sementlanishi natijasida asl porozitning katta qismi yutiladi. Misol uchun, mashhur tadqiqotlar cementlanish tufayli intergranulyar bo‘shliqlar deyarli to‘ldirilganida, reservoir sifati deyarli nolga teng ekanini ko‘rsatgan. Umuman olganda, sementatsiya va kompaksiyalash bo‘shliq tarmog‘ini kesib o‘tib, porozit va permeabiliteni sezilarli darajada pasaytiradi.

Bu jihatlar karbonat kollektorlarda kislotali ishlov berish samaradorligini baholashda muhim ahamiyatga ega. Bo‘shliq turi va tarqalishi, tabiiy yoriqlarining mavjudligi va karbonat toshlarning kimyoviy tarkibi kislotali eritmaning qanday tarqalishi va unga javob sifatini belgilaydi.

Kislotali ishlov berish (KIB) nazariyasi. Kislotali ishlov berish – qazilgan qavatni kislotali eritma bilan protsess qilish orqali porozit va permeabilitni oshirish texnologiyasi. Karbonat toshlarda HCl kislotasi bilan reaksiya quyidagicha sodir

bo'ladi:



Bu reaksiya juda tez bo'lib, erigan karbonatni kattagina quvvati bilan eritadi. Shunga ko'ra, kislotali ishlov berish natijasida butun kolonka bo'ylab teshilmaydigan, ammo bo'shliq va tabiiy yoriqlarga kirib boradigan oqim kanallari – “wormhole” lar hosil bo'ladi. Ushbu aralashuvning samaradorligi hosil bo'lgan wormhole kanallarining shakli va o'lchoviga bog'liq. [3]

– **Reaksiya kinetikasi:** Karbonat toshlardagi erish jarayoni odatda transport va yuzaki reaksiya darajalari bilan chegaralanadi. Tez injeksiya ostida kislotaning ko'pchiligi qavat yuzasida iste'mol bo'lib, chuqurga kam kirishi mumkin. Sekinroq oqim esa kislotaga chuqurroq kirish imkonini beradi. Bu balans Damköhler soni (Da) yordamida ifodalanadi.

– **Damköhler soni:** Damköhler soni reaksiya tezligi bilan massotransport orasidagi nisbatni ko'rsatadi. Uning qiymati kichik bo'lsa (transport tezligi katta, reaksiyadan ortiqcha), eritish tekislay boshlanadi; juda katta bo'lsa (reaksiya nihoyatda tez), faqat bombo'sh qatlam sirtida faol erish sodir bo'ladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, optimal wormhole tarmoqlanishi uchun Da qulay diapazonda bo'lishi kerak. Masalan, Fredd va Fogler (1998) ma'lumotlariga ko'ra, Damköhler ≈ 0.29 bo'lgan hollarda eng samarali kanallar hosil bo'ladi.

– **Wormhole hosil bo'lish shartlari:** Karbonat toshlarni kislotali ishlov berishda uch xil asosiy eritish naqshlari kuzatiladi: „yuzaki eritish“ (face dissolution), wormhole – ya'ni kanal bo'shlig'i, va to'liq bir tekis eritish (uniform dissolution). Qi va boshq. (2019) amaliy va simulyatsion tadqiqotlari shuni ko'rsatdiki, Damköhler ≈ 50 –200 oralig'ida aniq bitta yoki bir nechta wormhole kanallar hosil bo'ladi; Da 1–50 oralig'ida esa kanal bo'shlig'i shakllanib, tekis eritishga o'tish kuzatiladi; Da 200–500 oralig'ida esa yuqori reaksiya natijasida toshning butun yuzasida “yuzaki eritish”ga moyil xarakter paydo bo'ladi. Wormhole shakllanishiga kislotaning konsentratsiyasi, injeksiya tezligi, suyuqlik turi va toshning heterogenligi kabi omillar ham katta ta'sir ko'rsatadi.

Yuqoridagi jarayonlarni to'liq tushunish kislotali ishlov berish samaradorligini optimallashtirishga yordam beradi. Masalan, kerakli oqim tezligini tanlashda optimal Damköhler raqamiga erishish, kislotani tejash va quduqni barqaror stimulyatsiya qilishga xizmat qiladi. [4]

Qudug atrofi zonasining filtratsion-geometrik tuzilishini modellashtirish tamoyillari. Qudug atrofi zonasi (radial drenaj zonasi) modelingida an'anaviy ravishda suyuqlikning radial oqimi ko'rib chiqiladi. Bu zona quduq ishga tushganda boshqaruv ostiga olinadigan asosiy maydon bo'lib, u yerdagi o'tkazuvchanlik quduq samaradorligiga bevosita ta'sir qiladi.

– **Skin-faktor:** Skin-faktor – bu qo'shimcha bosim pasayishini tavsiflovchi o'lchov bo'lib, u quduq atrofi zonasidagi zararlanish yoki stimulyatsiya darajasini hisobga oladi. Musbat skin-faktor zonadagi quyuq zaharlanish (mudaviatsiya, loy, bosim yoriqlari) mavjudligini ko'rsatadi; salbiy skin esa stimulyatsiya (masalan, tortib erish) natijasida ortiqcha o'tkazuvchanlikka ega ekanini bildiradi. Tadqiqotlar ko'rsatadiki, muvaffaqiyatli KIBdan keyin skin-faktor katta darajada kamayadi va quduq oqim samaradorligi oshadi.

– **Mahsuldorlik indeksi (J):** Bu quduq olingan mahsulotni (q) rezervuar bosimi (p_{res}) va quduq bosimi (p_{wf}) farqiga nisbatini ifodalaydi, ya'ni $J = q / (p_{res} - p_{wf})$. Bu ko'rsatkich katta bo'lsa, quduq samaradorligi yuqori demakdir. Qisqa qilib aytganda, kislotali ishlov berish skin-faktorni kamaytirib, mahsuldorlik indeksini oshirishga xizmat qiladi.

Masalan, Keihani va boshq. (2024) misolida acidizatsiyadan so'ng skin-faktor ≈ -1.89 ga pasaygan, natijada quduq oqim samaradorligi sezilarli oshgan. Shuni ta'kidlash joizki, modellashtirishda bu omillar aniq hisobga olinadi: oqim tenglamalari radialy yechilib, yangi hosil bo'lgan wormhole yoki yoriq zonalarini skin-faktor orqali simulatsiyaga kiritiladi. Oqim va bosim tarqalishini aniqlash uchun shu zonada harakatlanayotgan reologik parametrlar (viskozlik, bosim) ham modellashtirish jarayonida baholanadi. [5]

Kollektor-muhitga bog'langan holda integratsiyalashgan modellashtirish yondashuvi. Kislotali ishlov berish samaradorligini baholashda geologik muhiti (litotip, porozite–permeabilite profili, tabiiy yoriqlar) va texnologik parametrlarni bir vaqtning o'zida tahlil qilish zarur. Buning uchun integratsiyalashgan model yondashuvi qo'llaniladi: qatlamning litotipi va acidizatsiya parametrlari (kislotaning turi, miqdori, injeksiya tezligi va boshqalar) ketma-ketlikda hisobga olinib, quduq atrofi zonasida hosil bo'ladigan skin-faktor va undan keyin quduq oqimi (debit) aniqlanadi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, rezervuarining permeabilitesi va tabiiy yoriq-shaklidagi holat kislotali ishlov berish natijasiga katta ta'sir ko'rsatadi. Masalan, Cao et al. (2024) integratsiyalashgan model yordamida tabiatdagi yoriqli karbonat konlarda kislotali ravna tartibini o'rganib chiqdi. Ular aniqladiki, yuqori o'tkazuvchanlik va yoriqlar bilan to'la zonalarida acidizatsiya samarasi maksimal bo'lishi mumkin, ammo shu bilan birga yuqori mahsuldorlik indeksiga erishish qiyin kechadi, chunki yoriqlar kislotali tarqatish samarasini kamaytiradi. Shuningdek, optimal kislotali oqim tezligi

rezervuar geometriyasi va permeabilite shartlariga bog'liq ekanligi ko'rsatilgan.

Bunday integratsiyalashgan modellashtirish yondashuvida natijaviy skin-faktor qiymati aniqlangach, klassik ochiq devor modeli ($q = (2\pi kh/\mu)[\ln(r_e/r_w) + S]^{-1}(p_{res} - p_wf)$) asosida yangi mahsuldorlik indeksi hisoblanadi. Bu yondashuv texnologik parametrlarni geologik ma'lumotlar bilan uzviy bog'lash orqali quduq samaradorligini prognoz qilishga va optimal acidizatsiya rejimini loyihalashga imkon beradi.

AMALIY MODELLASHTIRISH YONDASHUVLARI. Amaliy tadqiqotlarda kislotali ishlov berishni modelini qurishda bir nechta klassifikatsiya mavjud. Eng asosiylari quyidagilardir:

– **Empirik yondashuvlar:** Laboratoriya va maydon ma'lumotlariga tayangan holda tuzilgan korrelyatsiyalar va regressiya modellaridir. Masalan, turli tajribaviy parametrlar (bo'shliq hajmi, injeksiya sur'ati va h.k.) o'rtasidagi munosabatlarga asoslangan oddiy modellar empirik deb ataladi. Ular tezkor baholash uchun qulay, ammo faqat ma'lum sharoitlar uchun mos bo'ladi.

– **Yarim-analitik modellar:** Analitik yondashuv va eksperimental natijalarning kombinatsiyasidan iborat. Bunday modellar transport va reaksiya tenglamalarini qisman yechib, sodda ifodalar yoki integrallardan foydalangan holda kalkulyatsiya qilish imkonini beradi. Masalan, ba'zi ikki-o'lchovli yoki volumetrik modellar kislotali oqim va massasizlik muvozanatini yechishda ishlatiladi. Hoefner–Fogler modeli kabi klassik ishlar ham yarim-analitik modelga kiradi. [6]

– **Geometriyaga asoslangan modellar:** Bu usulda wormhole yoki yoriq strukturasining aniq geometrik ko'rinishi modellashtiriladi. Masalan, simulyatsion tarmoqli (network) modellari yoki fraktal modellar kislotali erigan kanal tizimining chuqur tavsifiga asoslanadi. Geometriyaga asoslangan modellar orqali hosil bo'lgan kanalning uzunligi va tarqalishini aniqlab, uning oqim samaralarini hisoblash mumkin.

Amaliy tadqiqotlar ko'rsatadiki, eng ishonchli natija ko'p hollarda bu yondashuvlarning kombinatsiyasidan olinganligi uchun, yarim-analitik va geometriyaga bog'langan usullar amaliy natijalarni takomillashtirishda muhim rol o'ynaydi.

MUHOKAMA. Yuqoridagi bo'limlarda karbonat konlar va ularni kislotali ishlov berish bilan bog'liq nazariyalar asosiy jihatlari ko'rib chiqildi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, karbonat kollektorlardagi litologiya va bo'shliq tuzilishi kislotali aralashuv natijasini belgilovchi asosiy omillardir. Masalan, boy silostiklarga ega bo'lgan yoki zich sementlangan qavatlarda kislotali ishlov berish natijasi past, ammo poroz karbonatlarda sezilarli samaradorlikka erishish mumkin. Reaktiv modellar va sinov natijalari shuni tasdiqlaydi: quduq atrofi zonasidagi zararlarni tozalash va yangi kanallar hosil qilish orqali oqim sig'imi ortadi.

Shuningdek, Damköhler soni va kislotali oqim tezligi singari parametrlar orqali

erish shakllarini boshqarish mumkinligi ham qayd etildi. Integratsiyalashgan yondashuv esa keng rezervuar omillarini hisobga olib, to'liq simulyatsiya qilish imkonini beradi. Shu bois, quduq stimulatsiyasini loyihalashda reservoir va texnologik parametrlarga mos holda majmualashgan modellar qo'llanilishi maqsadga muvofiqdir.

Kelajak tadqiqotlari uchun murakkab geologik sharoitlarni – masalan, qatlamli litologiya va tabiiy yoriqlar tarmog'ini – aniq hisobga oladigan yetuk modellar ishlab chiqish muhim bo'lib qoladi.

XULOSA. Mazkur maqolada karbonat kollektorlarda kislotali ishlov berish samaradorligini baholash uchun quduq atrofi zonasining geologik tuzilishi va modellashtirish metodlari ko'rib chiqildi. Birinchi navbatda, karbonat toshlarning litologik xususiyatlari, porozite-permeabilite tuzilmalari, katakchali va kavernoza tuzilmalar hamda diaqenez jarayonlari ta'kidlandi. Kislotali ishlov berish nazariyasi bo'limida esa kislotaning rezervuar toshini eritishi, reaksiya kinetikasi, Damköhler soni va wormhole hosil bo'lish mexanizmi ko'rib chiqildi. Quduq atrofi zonasi modellashtirishida esa filtratsion-geometrik strukturani tavsiflash, skin-faktor va mahsuldorlik indeksleri orqali samaradorlikni baholash usullari ko'rib chiqildi. Integratsiyalashgan modellashtirish yondashuvida litotip va KIB parametrlarini birlashtirib skin va oqim samarasi modellari misollar bilan ko'rsatildi. Yana bir bo'limda esa empirik, yarim-analitik va geometriyaga bog'langan modellarning amaliy qo'llanilishi muhokama qilindi.

Umuman olganda, so'nggi yillarda olib borilgan tadqiqotlar ushbu muammoni tushunishni kengaytirdi va ochiq misollar orqali kislotali ishlov berish samaradorligini baholash usullarini takomillashtirdi. Olgan bilimlar kelgusida quduq stimulyatsiyasini yanada aniqroq bashorat qilish va dizayn qilish uchun asos yaratadi.

ADABIYOTLAR

1. Rashid F., Glover P.W.J., Lorinczi P., Collier R., Lawrence J. *Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015.
2. Liu M., Zhang S., Mou J., Zhou F. *Wormhole propagation behavior under reservoir condition in carbonate acidizing*. Transport in Porous Media, 2013.
3. Qi N., Chen G., Fang M., Li B., Liang C., Ren X., Zhang K. *Damköhler number-based research on dividing dissolution patterns in carbonate acidizing*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019.
4. Mota T.M. *Wormhole geometry modelling on carbonate matrix acidizing: a literature review*. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 2024.
5. Keihani M.K., Mahdavi Kalatehno J., Yousefmarzi F. *A comprehensive analysis of carbonate matrix acidizing using viscoelastic diverting acid system in a gas field*. Scientific Reports, 2024.
6. Cao X., Ren J., Xin S., Guan C., Zhao B., Xu P. *Study of acid fracturing strategy with integrated modeling in naturally fractured carbonate reservoirs*. Processes, 2024.