

UO‘K: 622.276.63

KARBONATLI KOLLEKTORLARNI KISLOTALI ISHLOV BERISHDA TERMOBARIK SHAROITLARNING TEXNOLOGIK SUYUQLIKLAR VA REAKSIYA MAHSULOTLARI XOSSALARIGA TA’SIRI

Samatov Sherzod Shavkatovich¹ – mustaqil izlanuvchi (PhD),

ORCID: 0009-0007-2995-6478, E-mail: samatov@kstu.uz

Boyqobilova Mahliyo Maxmudovna¹ – doktorant (PhD),

ORCID: 0009-0008-7613-8547, E-mail: mahliyoboyqobilova@gmail.com

Bozorov Ulug‘bek Suyun o‘g‘li² – o‘qituvchi,

ORCID: 0009-0002-1622-6664, E-mail: ulugbek.bozorov.1991@gmail.com

Axatova Guliza Anvar qizi¹ – doktorant (PhD),

ORCID: 0009-0002-7458-6668, E-mail: ahadovaguliza@gmail.com

Ismatova Shirina Mahmud qizi¹ – magistrant, ORCID: 0009-0003-9151-4102,

E-mail: sharopovulugbek145@gmail.com

¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

²“Sanoat Energetika Guruhi” MChJ XK, Toshkent sh., O‘zbekiston

***Annotatsiya.** Ushbu maqolada karbonatli kollektorlarga kislotali ishlov berish jarayonida bosim (0,1–100 MPa) va haroratning (20–250°C) texnologik suyuqliklar (HCl, suv) hamda reaksiya mahsulotlari (CaCl₂, MgCl₂, CO₂, N₂) xossalariga ta’siri tahlil qilingan. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, chuqur qatlam sharoitida gazlar o‘ta kritik holatga o‘tadi, tuzlarning eruvchanligi ortadi va kislota qovushqoqligi sezilarli darajada pasayadi. Ushbu o‘zgarishlarni hisobga olish kislotali ishlov berish samaradorligini oshirish va eritish kanallarining rivojlanishini to‘g‘ri modellashtirish imkonini beradi.*

***Kalit so‘zlar:** karbonatli kollektor, kislotali ishlov berish, termobarik sharoitlar, xlorid kislota, fazaviy holat, qovushqoqlik, zichlik.*

УДК: 622.276.63

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СВОЙСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ И ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ ПРИ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКЕ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Саматов Шерзод Шавкатович¹ – самостоятельный исследователь (PhD)

Бойкабилова Махлиё Махмудовна¹ – докторант (PhD)

Бозоров Улугбек Суюн угли² – преподаватель,

Ахатова Гулиза Анвар кизи¹ – докторант (PhD)

Исматова Ширина Махмуд кизи¹ – магистрант

¹Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

²ИП ООО «Sanoat Energetika Guruhi», г. Ташкент, Узбекистан

***Аннотация.** В статье проанализировано влияние давления (0,1–100 МПа) и температуры (20–250°C) на свойства технологических жидкостей (HCl, вода) и продуктов реакции (CaCl₂, MgCl₂, CO₂, N₂) при кислотной обработке (КО) карбонатных коллекторов. Исследования показывают, что в условиях глубоких пластов газы переходят в сверхкритическое состояние, растворимость солей увеличивается, а вязкость кислоты значительно снижается. Учет этих изменений позволяет повысить эффективность КО и корректно моделировать развитие червоточин.*

***Ключевые слова:** карбонатный коллектор, кислотная обработка, термобарические условия, соляная кислота, фазовое состояние, вязкость, плотность.*

UDC: 622.276.63

INFLUENCE OF THERMOBARIC CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF TECHNOLOGICAL FLUIDS AND REACTION PRODUCTS DURING ACID TREATMENT OF CARBONATE RESERVOIRS

Samatov, Sherzod¹ – Independent Researcher (PhD)

Boyqobilova, Mahliyo¹ – Doctoral student (PhD)

Bozorov, Ulugbek² – Lecturer,

Ahatova, Guliza¹ – Doctoral student (PhD)

Ismatova, Shirina¹ - master's student

¹Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

²“Sanoat Energetika Guruhi” FE LLC, Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. This article analyzes the effect of pressure (0.1–100 MPa) and temperature (20–250°C) on the properties of technological fluids (HCl, water) and reaction products (CaCl₂, MgCl₂, CO₂, N₂) during acid treatment of carbonate reservoirs. Studies show that under deep reservoir conditions, gases transition to a supercritical state, salt solubility increases, and acid viscosity decreases significantly. Considering these changes allows for increasing the efficiency of acid stimulation and correctly modeling the development of wormholes.

Keywords: carbonate reservoir, acid treatment, thermobaric conditions, hydrochloric acid, phase state, viscosity, density.

Kirish

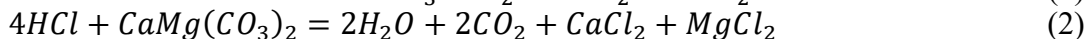
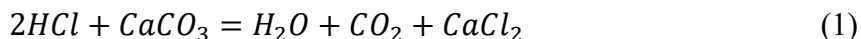
Bugungi kunda dunyodagi uglevodorod zaxiralarining 60% dan ortig‘i karbonatli kollektorlarda joylashgan bo‘lib, ularni o‘zlashtirishda quduq tubi zonasini (QTZ) o‘tkazuvchanligini oshirish muhim ahamiyat kasb etadi [1-3]. Karbonatli jinslarning kislotali eritmalar bilan yuqori reaksiya qobiliyati tufayli, kislotali ishlov berish eng keng tarqalgan usul hisoblanadi. Dunyo bo‘yicha yiliga 40 mingdan ortiq kislotali amaliyotlar bajariladi [4].

Biroq, kislotali ishlov berish jarayonini loyihalash va modellashtirishda ko‘pincha suyuqliklar va reaksiya mahsulotlarining xossalari standart sharoitlar uchun qabul qilinadi. Vaholanki, real kon sharoitida bosim va harorat keng diapazonda o‘zgarishi mumkin. Chuqur joylashgan qatlamlarda harorat 200°C dan, bosim esa 100 MPa dan oshishi kuzatiladi. Bunday termobarik sharoitlar kislotali eritmalar, suv va reaksiya natijasida hosil bo‘ladigan mahsulotlarning (CO₂, tuzlar) fazaviy holati, qovushqoqligi va zichligiga jiddiy ta‘sir ko‘rsatadi.

Ushbu tadqiqotning maqsadi – keng diapazondagi bosim va harorat o‘zgarishining kislotali ishlov berish jarayonida ishtirok etuvchi asosiy komponentlar xossalariga ta‘sirini tahlil qilish va bu orqali jarayonni modellashtirish aniqligini oshirishdir.

Materiallar va uslublar

Tadqiqot obyekti sifatida karbonatli jinslar (ohaktosh va dolomit) va 15% li xlorid kislotasi (HCl) eritmasi orasidagi o‘zaro ta‘sir jarayoni tanlandi. Asosiy kimyoviy reaksiyalar quyidagi tenglamalar orqali ifodalanadi [1, 5, 6]:



Tahlil davomida kislotali ishlash jarayonida yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan termobarik sharoitlar quyidagi diapazonlarda qabul qilindi (1-jadval).

1-jadval

Kislotali ishlov berish jarayonida yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan bosim va harorat diapazonlari

Modda	Joylashuv o‘rni	Harorat (T), °C	Bosim (P), MPa
CaCO ₃ va CaMg(CO ₃) ₂	QTZ	30 – 250	3 – 100
15% li HCl eritmasi	Quduq + QTZ	20 – 250	0,1 – 100
H ₂ O	Quduq + QTZ	20 – 250	0,1 – 100
CO ₂	QTZ	30 – 250	3 – 100
Tuzli eritmalar (CaCl ₂ , MgCl ₂)	QTZ	30 – 250	3 – 100
N ₂ (Azot)	Quduq + QTZ	20 – 250	0,1 – 100

Tadqiqot uslubi sifati sifatida mavjud eksperimental ma'lumotlar va termodinamik korrelyatsiyalarni qiyosiy tahlil qilish hamda modellashtirish uchun zarur bo'lgan bog'liqliklarni aniqlash qabul qilindi.

Tadqiqot natijalari

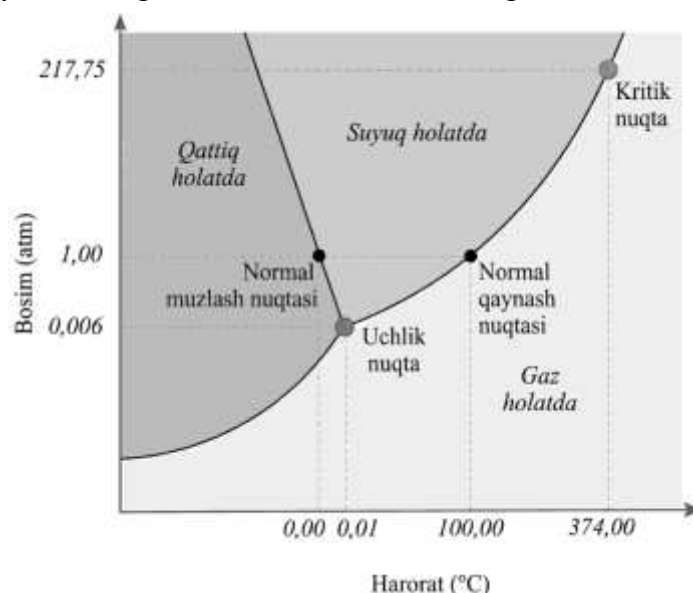
Suv va kislota eritmalarining xossalari tahlili. Kislotali eritmalarining asosiy qismini (85% gacha) suv tashkil etgani bois, ularning xossalari suvning termobarik xossalariga yaqin bo'ladi.

Suvning fazaviy holat diagrammasi tahlili shuni ko'rsatadiki, ko'rib chiqilayotgan diapazonda ($T = 20 - 250^{\circ}\text{C}$, $P = 0,1 - 100 \text{ MPa}$) suv va 15% li HCl eritmasi suyuq fazada bo'ladi. 15% li HCl ning muzlash harorati $-27,6^{\circ}\text{C}$ va qaynash harorati $+108^{\circ}\text{C}$ ni tashkil etadi.

Qovushqoqlik va zichlik. Suyuqliklarning qovushqoqligi asosan haroratga bog'liq bo'lib, bosimning ta'siri amaliy hisob-kitoblar uchun ahamiyatsizdir. Harorat oshishi bilan suv va kislota eritmasining qovushqoqligi keskin kamayadi. Masalan, 15% li HCl eritmasining qovushqoqligi 20°C da $1,26 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ni tashkil etsa, harorat oshishi bilan bu ko'rsatkich pasayib boradi.

HCl eritmaları va hosil bo'ladigan tuzlar tarkibiga kiruvchi asosiy komponent H_2O hisoblanadi, shuning uchun ularning xususiyatlari ko'p jihatdan suvning xususiyatlari bilan belgilanadi. Standart sharoitlarda suv $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ qovushqoqlikka va 1000 kg/m^3 zichlikka ega suyuqlikdir.

H_2O ning fazaviy holat diagrammasi 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. H_2O ning fazaviy holat diagrammasi.

Bosimning suyuqlik zichligiga ta'siri quyidagi formula orqali ifodalanadi:

$$\rho(P, T) = \rho_0(P_0, T)[1 + c_w(P - P_0)], \quad (3)$$

bu yerda c_w – suyuqlikning siqiluvchanlik koeffitsiyenti ($0,5 \cdot 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$ atrofida). Kislotali ishlov berishda haydaladigan suyuqlik hajmlari nisbatan kichik bo'lgani uchun zichlikning bosimdan o'zgarishini e'tiborsiz qoldirish mumkin, ammo harorat ta'siri juda muhimdir.

Reaksiya mahsulotlari (tuzlar). Xlorid kislotaning ohaktosh va dolomit bilan reaksiyasi natijasida CaCl_2 va MgCl_2 tuzlari hosil bo'ladi. Hisob-kitoblarga ko'ra, 15% li HCl reaksiyaga kirishganda hosil bo'lgan eritmada CaCl_2 ning massaviy konsentratsiyasi 20,5% ni, dolomit bilan reaksiyada esa tuzlar aralashmasining umumiy konsentratsiyasi 19,3% ni tashkil qiladi.

Ushbu tuzlarning suvda eruvchanligi harorat oshishi bilan ortadi. CaCl_2 va MgCl_2 eritmalarining qaynash harorati toza suvnikidan yuqori bo'lib, ko'rib chiqilayotgan sharoitlarda ular to'liq erigan holatda va suyuq fazada bo'ladi.

Tuzli eritmalar zichligi (ρ) va qovushqoqligini (μ) aniqlash uchun quyidagi empirik korrelyatsiyalardan foydalanish tavsiya etiladi:

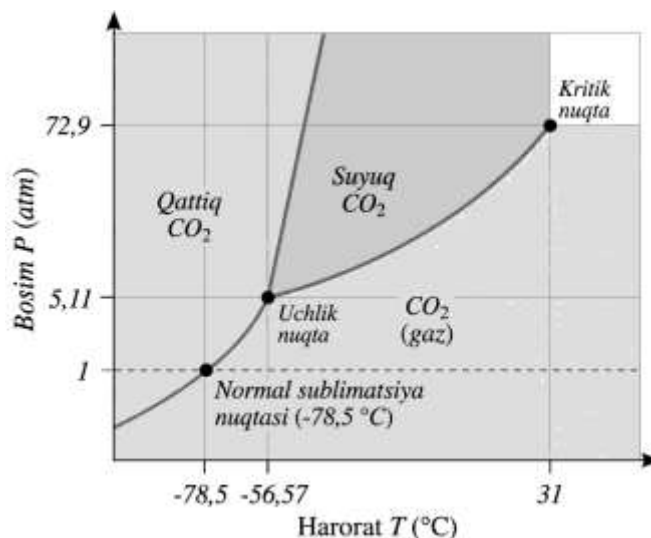
$$\rho = \rho_w \exp[w(a_1 + a_2 10^{-4}t - a_3 10^{-6}t^2)] \quad (4)$$

$$\mu = \mu_w \exp[w(b_1 + b_2 10^{-2}t - b_3 10^{-7}t^2)], \quad (5)$$

bu yerda w – tuzning massaviy ulushi, a_i va b_i – tuz turiga bog‘liq empirik koeffitsiyentlardir. Masalan, $CaCl_2$ uchun $a_1 = 0,8101$, $b_1 = 3,4143$ qiymatlari adabiyotlarda keltirilgan. Agar tog‘ jinsi aralash tarkibga ega bo‘lsa (ohaktosh va dolomit), eritmaning xossalarini aniqlashda additivlik tamoyilidan foydalanish maqsadga muvofiqdir.

Karbonat angidrid (CO_2) ning fazaviy holati va xossalari tahlili. Kislotali ishlov berish reaksiyasining asosiy mahsulotlaridan biri karbonat angidrid gazidir. Standart sharoitda u gazsimon holatda bo‘lsa-da, qatlam sharoitida uning xossalari keskin o‘zgaradi.

Fazaviy holat. CO_2 uchun kritik parametrlar $P_{kr} = 72,9$ atm (7,39 MPa) va $T_{kr} = 31^\circ C$ ni tashkil etadi [7-8].



2-rasm. Karbonat angidrid (CO_2) ning fazaviy holat diagrammasi.

Tadqiq qilinayotgan termobarik sharoitlarda ($P = 3\text{--}100$ MPa, $T = 30\text{--}250^\circ C$) karbonat angidrid asosan o‘ta kritik flyuid holatida bo‘ladi. Bu holatda modda gazlarga xos past qovushqoqlikka va suyuqliklarga xos yuqori zichlikka ega bo‘ladi. Faqatgina bosim 3,0 dan 7,3 MPa gacha bo‘lgan tor diapazonda u gaz holatida uchrashi mumkin.

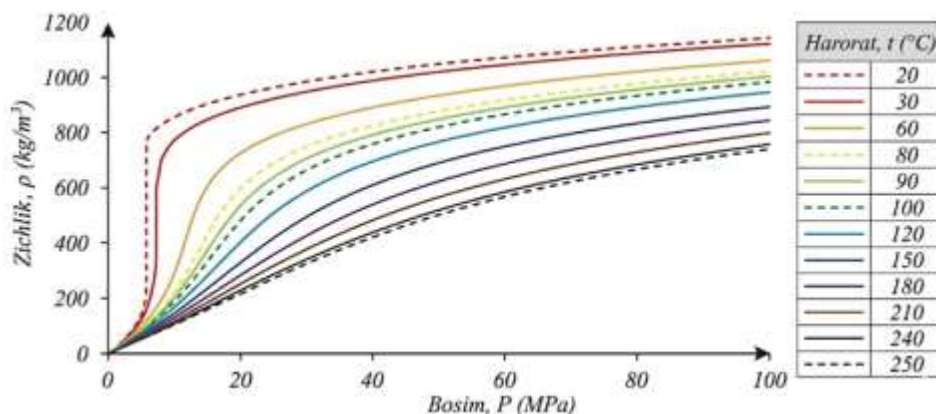
Eruvchanlik. CO_2 suvda yaxshi eriydigan gaz hisoblanadi. Namiot A.Yu. [9] tadqiqotlariga ko‘ra, bosim oshishi bilan uning eruvchanligi ortadi, harorat oshishi bilan esa dastlab kamayib, so‘ngra yana ortadi. Kislotali ishlov berish jarayonida ajralib chiqadigan CO_2 hajmi (taxminan 55 m³/t) suvda erish qobiliyatidan yuqori bo‘lishi mumkin, bu esa erkin gaz fazasining paydo bo‘lishiga olib keladi.

Zichlik va qovushqoqlik. Taklif etilgan [10] holat tenglamalariga ko‘ra, CO_2 ning zichligi bosim va haroratga kuchli bog‘liq (3-rasm).

Reaksiya natijasida ajralib chiqqan gazning hajmiy koeffitsiyenti 0,029–0,0025 oraliqda o‘zgaradi. Tadqiqotlarga [11] ko‘ra, CO_2 qovushqoqligi bosim oshishi bilan ortadi.

Azot (N_2) ning xossalari tahlili. Azot odatda quduqni o‘zlashtirish va kislotali kompozitsiyalarni ko‘piklashtirish yoki haydash uchun ishlatiladi.

Fazaviy holat. Azotning kritik parametrlari juda past: $T_{kr} = -146,9^\circ C$ va $P_{kr} = 33,9$ atm (3,4 MPa) [12].



3-rasm. CO_2 zichligining bosim va haroratga bog‘liqligi

Shu sababli, quduq tubi zonasida ($P > 3,4$ MPa) azot doimo o‘ta kritik flyuid holatida bo‘ladi. Faqat quduq stvolida, bosim 3,4 MPa dan past bo‘lgan yuqori intervallarda u gaz holatiga o‘tadi.

Eruvchanlik va zichlik. Azotning suvda eruvchanligi CO_2 ga nisbatan ancha past bo‘lib, maksimal termobarik sharoitlarda $24 \text{ m}^3/\text{t}$ dan oshmaydi. Uning zichligi va qovushqoqligi Jakobsen R.T. [13] va Span R. [14] ishlari asosida tahlil qilindi. Bosim 100 MPa gacha oshganda azot zichligi $399 \text{ kg}/\text{m}^3$ gacha yetishi mumkin.

Muhokama

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, an’anaviy yondashuvlarda gazlarni ideal gaz qonunlari bo‘yicha hisoblash chuqur qatlamlar uchun katta xatoliklarga olib keladi.

1. *Gidrodinamik modellashtirishdagi ahamiyati:* Reaksiya mahsulotlari (CO_2) va texnologik gaz (N_2) qatlam sharoitida suyuqlikka yaqin zichlikka ega bo‘lgan “o‘ta kritik flyuid” holatida bo‘ladi. Bu eritish kanallari o‘shishini modellashtirishda (masalan, Pekle va Damkeler sonlari asosidagi modellarda [15-16]) diffuziya va konveksiya jarayonlarini qayta ko‘rib chiqishni talab qiladi.

2. *Tuzlarning cho‘kish xavfi:* $CaCl_2$ va $MgCl_2$ eritmalarining yuqori haroratlarda eruvchanligi ortishi [17] quduq tubi zonasida tuz tiqilmalari hosil bo‘lish xavfini kamaytiradi. Bu esa yuqori minerallashtirilgan qatlam suvlari mavjud bo‘lgan konlarda ham 15% li HCl dan xavfsiz foydalanish imkonini beradi.

3. *Kislota qovushqoqligining pasayishi:* Haroratning oshishi bilan kislota qovushqoqligining keskin pasayishi (suvga o‘xshash tarzda) uning qatlamga kirib borish tezligini oshiradi, ammo “barmoqsimon” kirib borish effektini kuchaytirishi mumkin. Bu esa kislotani sekinlashtiruvchi agentlar yoki qovushqoqlikni oshiruvchi polimerlardan foydalanish zarurati borligini ko‘rsatadi.

Xulosa

Ushbu maqolada 0,1–100 MPa bosim va 20–250°C harorat oralig‘ida karbonatli kollektorlarni kislotali ishlash jarayonidagi fizik-kimyoviy o‘zgarishlar tahlil qilindi. Asosiy xulosalar:

1. *Suyuqliklar:* Suv va 15% li HCl eritmasi ko‘rib chiqilgan barcha diapazonda suyuq fazada qoladi. Ularning zichligi va qovushqoqligi asosan haroratga bog‘liq bo‘lib, bosimning ta’siri amaliy jihatdan ahamiyatsiz.

2. *Tuzlar:* Reaksiya mahsulotlari ($CaCl_2, MgCl_2$) qatlam sharoitida to‘liq erigan holatda bo‘lib, cho‘kma hosil qilmaydi.

3. *Gazlar:* Karbonat angidrid va azot chuqur qatlam sharoitida gaz emas, balki o‘ta kritik flyuid holatida bo‘ladi. CO_2 ning katta qismi suvda va neftda erib ketadi, erimagan qismi esa suyuqlikka yaqin xossalarni namoyon qiladi.

4. *Amaliy tavsiya:* Kislotali ishlov berishni loyihalashda va simulyatorlarda (masalan, WellStim [18]) hisoblashlarni bajarishda gazlarning real holat tenglamalaridan foydalanish va suyuqliklarning haroratga bog‘liq qovushqoqlik o‘zgarishini inobatga olish zarur.

Adabiyotlar

- [1] Глуценко В.Н., Силин М.А. Нефтепромысловая химия: в 5-ти т. Т. 4: Кислотная обработка скважин. – М.: Интерконтакт Наука, 2010. – 703 с.
- [2] Maxmudov S.I., Samatov Sh.Sh., Jo‘rayeva G.Ch. Quduq atrofi zonasining geologik tuzilishining kislotali ishlov samaradorligiga ta’siri // Ta’lim Innovatsiyasi va Integratsiyasi. – 2025. – T. 54. – № 1. – B. 223–226.
- [3] Meyliyev X.B., Samatov Sh.Sh., Boyqobilova M.M. Physicochemical transformation processes in the near-wellbore zone of different reservoir types // Innovatsion texnologiyalar. – 2026. – T. 60. – № 4. – B. 33–41. – DOI: 10.70769/2181-4732.ITJ.2025-4.04.
- [4] Daccord G., Lietard O., Lenormand R. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid. Part II. Convection vs Reaction, behavior diagram // Chemical Engineering Science. – 1993. – Vol. 48. – № 1. – P. 179-186.

- [5] Axatova G.A., Samatov Sh.Sh., Jo‘rayeva G.Ch. Karbonat kollektorlarda kislotali ishlov berish samaradorligini quduq atrofi zonasining geologik tuzilishi bilan uyg‘un modellashtirish // Ta‘lim Innovatsiyasi va Integratsiyasi. – 2025. – T. 54. – № 1. – B. 217–222.
- [6] Samatov Sh.Sh., Maxmudov S.I. Optimization of acidizing in carbonate reservoirs with explicit account of near-wellbore geological structure and hydrodynamic conditions // Universum: технические науки. – 2025. – № 10 (139). – P. 45–49. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20968>
- [7] Никольский Б.П., Григоров О.Н., Позин М.Е. Справочник химика. Т. 1. – М.: Химия, 1966. – 1072 с.
- [8] Ermatov N.X., Samatov Sh.Sh., Hayitov L.K. Karbonat kollektorlarida kislotali ishlov berish samaradorligini oshirish // JizPI Xabarnomasi. – 2025. – № 3. – B. 265–272.
- [9] Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде: справ. пособие. – М.: Недра, 1991. – 167 с.
- [10] Span R., Wagner W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1996. – Vol. 25. – № 6. – P. 1509-1596.
- [11] Wakeham W.A. The viscosity of carbon dioxide // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1998. – Vol. 27. – № 1. – P. 31-44.
- [12] Ermatov N.X., Samatov Sh.Sh., Hayitov L.K. Karbonat kollektorlarida kislotali ishlov berishni modellashtirish va samaradorligini oshirish yo‘llari // Geologiya fanlari, innovatsion rivojlanish, mutaxassislar tayyorlashning dolzarb muammolari va istiqbollari. Xalqaro anjuman. Toshkent, 7-may 2025. – B. 272–274.
- [13] Jacobsen R.T., Stewart R.B., Jahangiri M. Thermodynamic properties of nitrogen from the freezing line to 2000 K at pressures to 1000 MPa // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1986. – Vol. 15. – № 2. – P. 735-909.
- [14] Span R., Lemmon E.W., Jacobsen R.T., Wagner W., Yokozeki A. A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperatures from 63.151 to 1000 K and pressures to 2200 MPa // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 2000. – Vol. 29. – № 6. – P. 1361-1433.
- [15] Samatov Sh.Sh., Boyqobilova M.M., Jo‘rayeva G.Ch. Kislotali ishlov berish vaqtida hosil bo‘ladigan sho‘r eritmalarning fizik-kimyoviy xossalari va issiqlik-massa almashinuvi: model va tajriba // Yashil iqtisodiyot va raqamlashtirish davrida neft va gaz sanoatini rivojlantirishning zamonaviy tendensiyalari. IV xalqaro anjuman. Toshkent, 30–31 oktabr 2025. – B. 133–134.
- [16] Каневская Р.Д., Новиков А.В. Методы моделирования червоточин при соляно-кислотном воздействии на карбонатные пласты // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 3. – С. 19-28.
- [17] Перри Д.Г. Справочник инженера-химика. Т. 1. – Л.: Химия, 1969. – 640 с.
- [18] Хузин Р.А. Оптимизация повторных кислотных обработок на основе совершенствования подходов к моделированию // ПРОнефть. – 2020. – № 1. – С. 47-53.