

УДК622.276.523 (043); <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-4.16>
<https://orcid.org/0000-0001-7331-1633>
<https://orcid.org/0000-0001-7995-5560>
<https://orcid.org/0009-0004-3005-1375>
<https://orcid.org/0000-0001-7995-5560>
<https://orcid.org/0009-0003-9615-3852>
<https://orcid.org/0000-0002-9530-2313>

КАРБОНАТТЫ КЕН ОРЫНДАРЫНДА ҚЫШҚЫЛ ӨҢДЕУДІҢ ТИІМДІЛІГІН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН МОДЕЛЬДЕРДІ ЗЕРТТЕУ



Г.Ж. МОЛДАБАЕВА¹,
техника ғылымдарының
докторы, профессор,
g.moldabayeva@satbayev.university



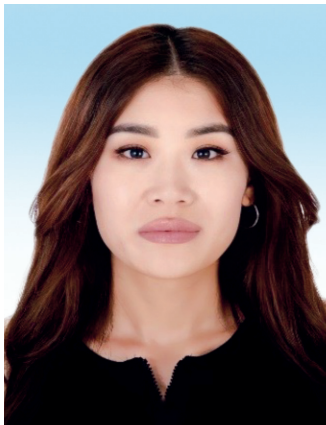
Р.Т. СУЛЕЙМЕНОВА²,
доктор PhD,
қауымдастырылған профессор,
raikhan.suleimenova@aogu.edu.kz



А.Л. КОЗЛОВСКИЙ¹,
PhD, SU,
kozlovskiy.a@inp.kz



М.А. САДВАКАСОВ¹,
докторант,
mukan-64@mail.ru



А.С. МУХСИ²,
докторант,
a.mukhsi@aogu.edu.kz



А. КУАНЫШОВ²,
докторант,
petrolshekel@gmail.com

¹САТПАЕВ УНИВЕРСИТЕТ,
Республика Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

²АТЫРАУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА ИМ.САФИ УТЕБАЕВА,
Республика Казахстан, 060027, г. Атырау, ул. Баймуханова, 45а

Бұл мақалада ерітінді айдау тәсілін қолдануды негізге ала отырып карбонатты жыныстарды қышқылмен өңдеу бойынша әдеби деректерді талдау нәтижелері келтірілген. Карбонаттарды қышқылмен өңдеу процесін тиімді жобалау мақсатында қышқылмен өңдеуге, қоспаларды таңдауға және модельдеу процестеріне арналған әртүрлі сұйықтықтарға талдау жасалды.

Теориялық модельдер қышқылды өңдеудің тиімділігін болжауға арналған болса да, олардың кен орны деңгейінде масштабтау үшін практикалық қолданылуы белгісіз болып қалады. Зертханалық деректерді тиімді болжау ұңғы дебитін арттыру мақсатында масштабтау әрдайым кен орнында өңдеудің әдеттегі мәндеріне сәйкес келетін нәтижелерге әкелмейді. Қазіргі модельдерде саңылауларының басым енуін есептеу үшін құбыр геометриясын қолдану және саңылауларының тығыздығын енгізу арқылы олардың арасындағы бәсекелестікті ескеру ұсынылады. Дегенмен, тау жыныстарының құрылымына және айдау жағдайларына кеуекті ортаның саңылаулары бойынша негізгі сезімтал мәндерді тағайындау негізгі қиындық болып табылады. Доминантты саңылауларының ұзындығын болжаудың орнына, қышқыл айдау нәтижесінде пайда болатын өткізгіштікті бағалауға назар аударған жөн. Алайда, еру коэффициентін алдын-ала есептемей, өткізгіштікті бағалау мүмкін емес.

Модельдеу нәтижелері қабатта әртүрлі ойық немесе жарықшақ аймақтарының болуы қышқылдану процесіне, әсіресе кеуекті орта саңылауларының таралу бағытына айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді. Бұл бағытты ауытқу немесе баяулату агенттерін қосу арқылы ішінара басқаруға болады.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: кенорын, игерудің соңғы сатысы, кеуекті орта, саңылаулар, кортанатты жыныстар, мұнай бергіштікті арттыру.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК В КАРБОНАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Г.Ж. МОЛДАБАЕВА¹, доктор технических наук, профессор, moldabayeva@satbayev.university

А.Л. КОЗЛОВСКИЙ¹, PhD, SU, kozlovskiy.a@inp.kz

М.А. САДВАКАСОВ¹, докторант, mukan-64@mail.ru

Р.Т. СУЛЕЙМЕНОВА², доктор PhD, ассоц.профессор, raikhan.suleimenova@aogu.edu.kz

А.С. МУХСИ², докторант, a.mukhsi@aogu.edu.kz

А.Н. КУАНЫШЕВ², докторант, Petrolshekel@gmail.com

¹СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ,
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтбаев к., 22

²САФИ ӨТЕБАЕВ АТЫНДАҒЫ АТЫРАУ МҰНАЙ ЖӘНЕ ГАЗ УНИВЕРСИТЕТІ
Қазақстан Республикасы, 060027, Атырау қ., Баймуханов к., 45А

Представлены результаты анализа имеющихся литературных данных по кислотной обработке карбонатов, основанного на растворном подходе. Был проведен анализ различных жидкостей для кислотной обработки, выбора добавок и процедур моделирования с целью оптимального проектирования процесса кислотной обработки карбонатов.

Выбранные теоретические модели предназначены для прогнозирования эффективности кислотных обработок, их практическая применимость для масштабирования на

уровне месторождения остаётся неопределённой. Масштабирование лабораторных данных по оптимальному дебиту не всегда приводит к результатам, соответствующим обычным значениям обработки на месторождении. В современных моделях предлагается использовать геометрию трубы для расчета доминирующего проникновения червоточин и учитывать конкуренцию между ними, вводя плотность червоточин в пористой среде. Однако назначение значений, чувствительных к структуре породы и условиям закачки, представляет собой основную трудность. Вместо прогнозирования длины доминирующих червоточин предпочтительно сосредоточиться на оценке проницаемости, возникающей в результате кислотной закачки. Однако оценка проницаемости невозможна без предварительного расчета коэффициента растворения.

Результаты моделирования демонстрируют, что существование различных зон выемок или трещин в пласте оказывает значительное влияние на процесс закисления, особенно на направление распространения червоточин. Это направление можно частично контролировать, добавляя отклоняющие или замедляющие агенты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: месторождения, конечная стадия разработки, пористая среда, червоточины, корбонатные породы, повышение нефтеотдачи.

INVESTIGATION OF MODELS FOR PREDICTING THE EFFECTIVENESS OF ACID TREATMENTS IN CARBONATE DEPOSITS

G. MOLDABAEVA¹, doctor of Technical Sciences, professor, moldabayeva@satbayev.university

A.L. KOZLOVSKIY¹, doctor PhD, kozlovskiy.a@inp.kz

M.A. SADVAKASSOV¹, докторант, mukan-64@mail.ru

R. SULEIMENOVA², PhD, Associated Press. professor, raikhan.suleimenova@aogu.edu.kz

A. MUKHSI², doctoral student, a.mukhsi@aogu.edu.kz

A. KUANYSHEV², doctoral student, Petrolshekel@gmail.com

¹SATBAYEV UNIVERSITY,
Republic of Kazakhstan, Almaty, 050000, Satpayev str. 22

²ATYRAU UNIVERSITY OF OIL AND GAS NAMED AFTER SAFI UTEBAEV,
the Republic of Kazakhstan, Atyrau, 060027, Baimukhanov, 45A

This article presents the results of an analysis of the available literature data on the acid treatment of carbonates based on the solution approach. The analysis of various acid treatment liquids, the choice of additives and modeling procedures was also carried out in order to optimally design the process of acid treatment of carbonates.

Although theoretical models are designed to predict the effectiveness of acid treatments, their practical applicability for scaling at the field level remains uncertain. Scaling laboratory data to the optimal rate does not always lead to results corresponding to the usual values of processing at the field. In modern models, it is proposed to use the geometry of the pipe to calculate the dominant penetration of wormholes and take into account the competition between them, introducing the density of wormholes in a porous medium. However, assigning values that are sensitive to the rock structure and injection conditions is a major difficulty. Instead of predicting the length of dominant wormholes, it is preferable to focus on estimating the permeability resulting from acid injection. However, the permeability assessment is not possible without first calculating the dissolution coefficient.

The simulation results demonstrate that the existence of various zones of recesses or cracks in the formation has a significant impact on the acidification process, especially on the direction of wormhole propagation. This direction can be partially controlled by adding deflecting or retarding agents.

KEY WORDS: deposits, final stage of development, porous medium, wormholes, carbonate rocks, enhanced oil recovery.

Кіріспе. Карбонатты жыныстар биохимиялық және бейорганикалық процестер арқылы түзілуі мүмкін. Алайда, әлемдегі карбонаттардың көпшілігінің тұндырылуы биологиялық белсенділікпен бақыланатыны анықталды. Карбонатты тұндыру жарыққа, температураға, тұздылыққа және қоректік заттардың болуына байланысты өте нақты қоршаған орта жағдайларын қажет етеді. Карбонаттар көмірсутектерді барлау мен өндіруде қолданылатын негізгі коллекторлық жыныстар болып табылады. Тиісінше, карбонаттардың көпшілігі тропикалық, таяз теңіз шөгінді ортасында түзіледі. Бұл жыныстар айтарлықтай диагенетикалық өзгерістерге бейім, өйткені олар химиялық өзгерістерге, қайта кристалдануға және еру процестеріне өте сезімтал (Major and Holtz, 1997). Көмірсутектердің орасан зор кен орындары Таяу Шығыста, Ресейде, Қазақстанда және Ливияда ашылып, пайдаланылуда.

Олар коллекторлық қасиеттерге қатысты кластикалық коллекторлармен салыстырғанда өте гетерогенді. Дүние жүзінде мұнайдың 60%-дан астамы карбонатты коллекторларда кездеседі (Roehl and Choquette, 1985). Дәстүрлі мұнайдың әлемдік дәлелденген қорының 62% -ы парсы шығанағы елдерінде. Бұл мұнай қорларының 70%-ы карбонатты жыныс коллекторларында деген сөз.

Зерттеу әдістері мен материалдары. Карбонатты жынысты қышқылмен өңдеуді матрицалық қышқылды өңдеуге және жарықшақты өңдеу деп бөлуге болады. Матрицалық қышқылмен өңдеу кезінде қышқыл әдетте кеуекті ортада саңылаулар деп аталатын қышқылдың еру арналарын түзу үшін кеуекті тау жынысы матрицасына айдалады. Жарықшақты қышқылмен өңдеу кезінде қышқыл тау жыныстарында гидравликалық жарықтар түзу үшін жоғары жылдамдықпен және қысыммен айдалады, олар кейіннен жарықтардың ұштары бойымен қышқылмен ойылған гетерогенді арналардың түзілуіне байланысты жабылғаннан кейін өткізу қабілетін сақтайды [1,2].

Матрицалық интенсификация – бұл еріткішті кейбір материалдарды сұйылту үшін қабатқа айдау әдісі, сондықтан ұңғыма аймағына жақын жерде өткізгіштігін қалпына келтіру немесе арттыру мақсатында өткізілетін шара. Мұндай әдістер "матрицалық" деп аталады, өйткені еріткіш жарықтарды пайда болдырмас үшін қабатты жарып шығу қысымынан төмен қысыммен айдалады [3,4]. Мақсат – ұңғыма оқпанына жақын өткізгіштікті едәуір арттыру немесе қалпына келтіру.

Органикалық қышқылдар әлсіз қышқылдар деп аталады, өйткені олар суда толық иондалмайды немесе диссоциацияланбайды. Иондалған және иондалмаған органикалық қышқылдардың екі күйі арасында тепе-теңдікке қол жеткізіледі. Бұл тепе-теңдік қышқылдың диссоциация константасымен (K_d) сипатталады. Ол өрнек келесідей:

$$K_d = \frac{(H_2O^+)(A^-)}{(HA)} \quad (1)$$

(HA) – ерітіндідегі HA үлгісінің белсенділігі, ал (A^-) – A^- үлгі белсенділігі. Белсенділікті концентрацияға тең деп санауға болады. Бұл сұйылтылған ерітіндіге қатысты, бірақ жоғары концентрацияланған ерітінділерге қатысты емес.

Органикалық қышқылдардың диссоциациялану константалары әдеттегі бейорганикалықтарға қарағанда әлдеқайда төмен. Бұл қышқылдар салыстырмалы жағдайларда тұз қышқылына қарағанда реактивті иондалған күйге аз дәрежеде дис-

социацияланады, сондықтан "әлсіз қышқыл" деп аталады. Диссоциация константасы келесі тәуелділікке сәйкес температураға байланысты өзгереді:

$$-\log K_d = \frac{A_1}{T} - A_2 + A_3 T \quad (2)$$

Мұндағы коэффициенттер берілген органикалық қышқылға тән. Бұл тәуелділік диссоциация константасы 122 мен 176°F (50 және 80°C) арасында өте аз өсетінін көрсетеді, бірақ содан кейін температура одан әрі көтерілгенде төмендейді (Т термині басым болады). Сондықтан жоғары температурада (бұл қышқылдардың жалпы қолданылуы) олар төмен температураға қарағанда аз иондалған немесе реактивті болып келеді [4-6].

Кесте 1 – Өр түрлі қышқылдар үшін диссоциация тұрақтылары (константа)

| Қышқыл | 77°F (25°C) / 77°F (25°C) Диссоциация константасы | |
|-------------------|--|------------------|
| Тұз қышқылы | 10 | Күшті қышқыл |
| Күкірт қышқылы | 1.2×10^{-2} | |
| Фторсутек қышқылы | 3.53×10^{-4} | |
| Құмырсқа қышқылы | 1.77×10^{-4} | Әлсіз қышқыл |
| Сірке қышқылы | 1.76×10^{-5} | |
| Карбон қышқылы | 4.3×10^{-7} | |
| Бор қышқылы | 7.3×10^{-10} | Өте әлсіз қышқыл |

Диссоциация константалары төмен болғандықтан, сірке және құмырсқа қышқылдары HCl-мен салыстырғанда баяу немесе кешіктірілген реакцияларға ие. Сірке және құмырсқа қышқылдарының диссоциация константасы температура жоғарылаған сайын төмендейді, ал минералды қышқылдардың көпшілігінде диссоциация константалары жоғарылайды.

Даккорд пен Лиотард [7-9] кальциттер мен жоғары температуралы доломиттердегі HCl реакциясы үш түрлі режимде жүретінін көрсетті.

1. Айдау қарқыны төмен болған кезде еріту режимі "компактты", яғни кішігірім деп айтылады және қышқыл тек ұңғыманың түп аймағындағы еритін қабат арқылы кеуек қабырғаларына айдалады. Мұндай жағдайларда ұңғымаларды ынталандыру, оның мұнай бергіштігін арттыру нашар болады.

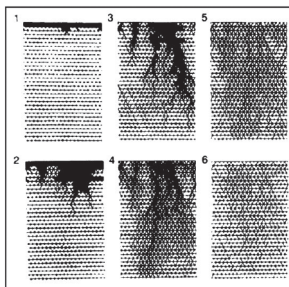
2. Орташа ағын жылдамдығында қышқыл басым жолдарды ашады және фракталдық геометриясы бар "кеукті ортадағы саңылаулар" желісін жасайды.

3. Айдаудың жоғары шығындарында еріту процесі HF құмтастарының күрт шығуымен салыстырылады және кеуктіліктің біркелкі өсуіне әкеледі.

Үш режимді ажырату үшін қолданылатын негізгі мәнді Пеклет саны арқылы анықтаймыз, ол келесі өрнек:

$$P_e = \frac{Q\sqrt{k}}{\varphi(r_w h \pi) D} \quad (3)$$

Мұндағы D (қышқылдың диффузиялық қабілеті) температураға байланысты (T, °F), желілік саңылауларды түсініп кескіндеу үшін компьютерлік модельдеуді береді (Hoefner and Fogler, 1988): өрнекте кеукті орта екі өлшемді капиллярлық желімен ұсынылған.

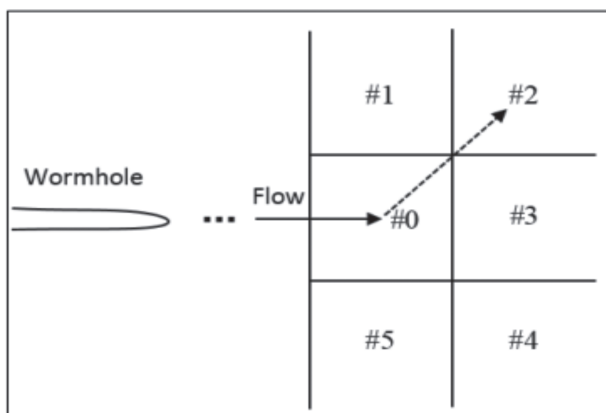


Сурет 1 – Тұрақсыз үлгілердің дамуына қатысты ұқсас нәтижелер алынды [7]

Олардың басты артықшылығы – еру функциясы мен ағын параметрлерін эксперименттік мүмкін болғаннан әлдеқайда кең ауқымда оңай өзгертуге болады.

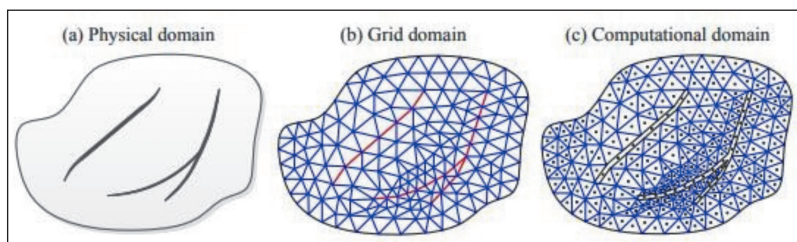
Айдау жылдамдығы мен еру жылдамдығының қышқылдану тиімділігіне әсерін имитациялау үшін желілік модель жасалды. Модель бақылау параметрлері өзгерген кезде саңылауларының құрылымының эволюциясын дәл көрсетеді. Модель саңылауларының тармақталуының еру үшін қол жетімді минералдардың беткі аймағына әсері тұрғысынан ағын жылдамдығы мен реакцияның әсерін көрсетеді. Жоғары айдау жылдамдығында немесе төмен еру жылдамдығында саңылаулары жоғары тармақталған болады, нәтижесінде реакцияға ұшыраған бетінің меншікті аймағының ұлғаюы арнаның таралу жылдамдығын төмендетеді.

Осылайша, оңтайлы модельді табу үшін барлық айнымалыларды және визуалды бағалауды қолдана отырып, әртүрлі сценарийлерді талдай және интерполяциялай алатын тренажерлерді қолданған дұрыс.



Сурет 2 – Тау жынысы матрицасы арқылы дамып келе жатқан саңылауының қозғалыс траекториясы [8]

2-суретте тау жыныстарының матрицасы арқылы дамып келе жатқан саңылауының траекториясы өткізгіштігі жоғары жергілікті аймақтармен анықталған жолдармен өтеді, бұл сонымен қатар өткізгіштігі төмен аймақтағы сұйықтық ағынын айтарлықтай қиындатады.



Сурет 3 – Сыңалаулардың пайда болуын матрица түрінде есептеп модельдеу

3-суретте жарықшақты білдіретін қалың сызық матрицалық торды құрайтын үшбұрыштардың шеттері болып табылатын бірнеше сызықтық сегменттерге бөлінеді. Тор аймағында қосылыстар деп аталатын қосылыстардың үш түрі бар, олар матрица-матрица, матрица-көлбеу сыну және көлбеу сыну-көлбеу сыну.

Өндірістегі матрицалық қышқылдану ұңғыманың қабат қысымы жарықшақтардың пайда болу қысымынан төмен, ал беткі қысым жабдықтың шектеулеріне байланысты жер бетіндегі рұқсат етілген максималды қысымнан төмен болатын мәндерге дейін шектейді. Сондықтан қышқылмен өңдеу кезінде қолдануға болатын максималды ағынды анықтауға болады, ол келесі өрнек:

$$U_{max} = 0.092k(g_{fr}D_f - p_r)/r_w\mu(\ln \frac{r_e}{r_w} + S) \quad (4)$$

ұндағы U_{max} – қышқылдандыру үшін пайдалануға болатын максималды айдау ағыны ($m^3/сағат$); k – қабаттың өткізгіштігі; g_{fr} – қабаттың бұзылу градиенті (psi/ft); D – қабат тереңдігі (футы), P_r – қабат қысымы (psi); r_w – ұңғы радиусы (футпен есептегенде); r_e – ұңғы оқпаны радиусы (футпен есептегенде); S – скин-фактор, шексіз шама.

Тағы бір маңызды өлшемсіз мән – қышқыл сыйымдылығы. Ол айдалған қышқылдың берілген тау жынысын еріту қабілетін бағалайды. Анықтама бойынша, қышқыл сыйымдылығы – бұл еріген минералдардың көлем бірлігіне шаққандағы массасының көлем бірлігіне шаққандағы $rHCl$ минералдарының массасына қатынасы, ол келесі өрнек:

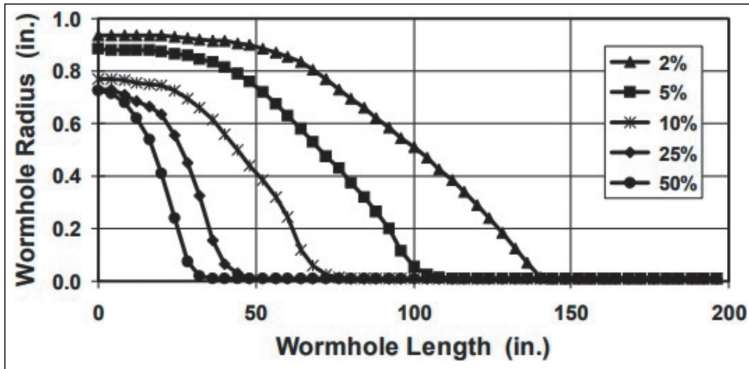
$$N_{Ac} = \frac{\varphi\beta C_{HCl}\rho_{HCl}}{(1-\varphi)\rho_{rock}} \quad (5)$$

мұндағы φ – жыныстың кеуекті ортасы; β – еру күші; C – салмақ пайызымен көрсетілген қышқыл концентрациясы; ρ_{HCl} және ρ_{rock} сәйкесінше қышқыл мен тау жыныстарының тығыздығы.

Бастапқы орташа кеуектіліктің саңылауларының таралуына әсерін зерттеу мақсатында жүргізілген Akanni O.O. зерттеуінде [11-13] 50% кеуектіліктің біркелкі емес диапазонында 10%, 20% және 30% кеуектіліктің бастапқы орташа мәндері бар сызықтық екі өлшемді ағынның үш жағдайы модельденеді.

Карбонатты коллекторлардың көпшілігі бірнеше масштабта гетерогенді. Бұл гетерогенділік қышқылды ынталандыру нәтижелеріне қатты әсер етеді, бұл әдетте ұңғымалардың өнімділігін арттыру үшін жасалады. Қабаттың кеуектілігінің саңылауына енуіне әсерін көрсету үшін бірқатар есептеулер жүргізілді. Мысалы, бор қабаттары әдетте 40-60% кеуектілікке ие, ал тығыз әктастардың кеуектілігі 10%-дан

аз. Матрицаның барлық кеуектілігі қышқыл ағыны үшін қол жетімді деп есептелді. Кеуектілік 2-ден 50%-ға дейін өзгерді. 4-суретте саңылауларды есептеу нәтижелері көрсетілген.



Сурет 4 – Саңылауының ұзындығына байланысты оның радиусы [10]

Кесте 2 – Есептеулерге арналған анықтамалық мәліметтер төмендегі кестеде келтірілген

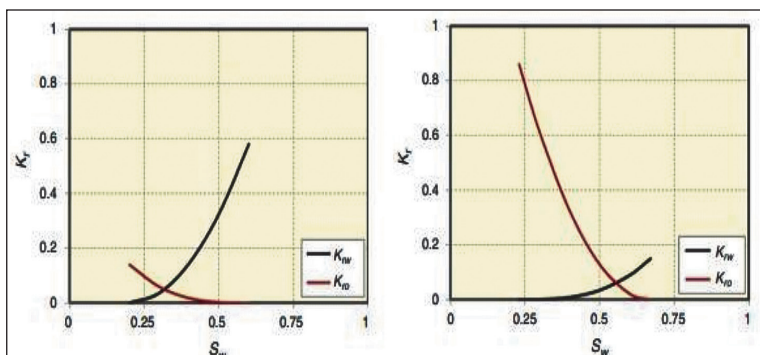
| Жыныс сипаттамалары | |
|---------------------------------|---------------------|
| Температура | 150°F |
| Қабаттың қалыңдығы | 50 фут |
| x өткізгіштігі | 1 мД |
| y өткізгіштік | 1 мД |
| z өткізгіштігі | 1 мД |
| Кеуектілік | 10% |
| Реакция жылдамдығы (тұрақтылар) | 1.0E-2 |
| Реакция тәртібі | 0.5 |
| Қышқылды өңдеу жоспары | |
| Сорғы қуаты | 5 баррель/мин |
| HCl Концентрациясы | 15% |
| HCl Көлемі | 5000 гал. |
| Жалпы айдау уақыты | 23.8 мин |
| Қалыпқа келтірілген сорғы қуаты | 0.1 баррель/мин/фут |
| Қалыпқа келтірілген көлем | 100 гал./фут |

Есептеулер бойынша бұл екі қисық 5-суретте көрсетілген, салыстырмалы өткізгіштік қисықтары тау жыныстарының сипаттамалары мен Eq.15 сулануының кең ауқымына арналған жалпыланған жыныс корреляциясы арқылы есептелінген.

$$k_{ro} = k_{rocw} \left[\frac{1-S_w-S_{orw}}{1-S_{iw}-S_{orw}} \right]^{n_{ow}} \tag{6}$$

$$k_{rw} = k_{rwr0} \left[\frac{S_w-S_{iw}}{1-S_{iw}-S_{orw}} \right]^{n_w} \tag{7}$$

Екі фазалы ағын үшін негізгі кеуекті орта микроарналарынан судың ағуы бір фазалы ағынға қарағанда қиынырақ. Аланған нәтижелерден қышқылды айдау алдында қалдық суы бар мұнай болса, қышқылды аз тұтыну кезінде жоғары тиімділікке қол жеткізуге болатынын көрсететінін көруге болады.



Сурет 5 – Суланумен салыстырмалы өткізгіштік қысықтарына әсері [20]

Ұңғыманы матрицалық қышқыл айдау үміткері ретінде танылғаннан кейін, әдеттегі жоба келесі қадамдарды қамтуы керек.

1. Скин-фактор себебін, түп аймақтың зақымдану дәрежесін және орналасқан жерін анықтау керек, құм тығындарын болдырмау.

2. Айдау сұйықтықтарының присадка күшейткіш параметрлерін күшейту үшін сұйықтықты немесе сұйықтық қоспаларды таңдау.

3. Матрицалық ағын режимінде рұқсат етілген максималды жылдамдықты/ қысымды анықтау.

4. Перфорацияланған аралықтың бір футына жарасжы сұйықтық көлемін анықтау.

Матрицалық өңдеуді жобалаудағы маңызды қадам матрицадағы ағын режимінің шарттарын анықтау болып табылады. Қабаттың бұзылуын болдырмау үшін қабат қысымы айдау қысымынан аспауы керек. Матрицалық өңдеу кезінде айдау қысымынан асатын қысым қажет емес, өйткені өңдеу сұйықтығы ұңғыма маңындағы зақымдануды ерітпеуі немесе таратпауы мүмкін [14-18].

Қабаттың бұзылуына әкелмейтін ең жоғары рұқсат етілген айдау жылдамдығы Дарси радиалды ағынының теңдеулері негізінде анықталады. Бұл теңдеу ағын өнімділігінің жеңілдетілген тәуелділігін білдіреді; ол өтпелі әсерлерді, көп фазалы ағынды немесе қабаттың гетерогенділігін ескермейді. Айдалатын сұйықтық сығылмайтын болып саналады. Тиімді өткізгіштік – бұл айдалатын сұйықтықтың өткізгіштігі. Скин-фактордың бастапқы мәнін ескере отырып алынған максималды айдау жылдамдығының мәні тек бастапқы жылдамдықты анықтау үшін нұсқаулық ретінде пайдаланылуы мүмкін [19, 20].

$$q_{max} = \frac{4.917 \times 10^{-6} kh(p_{fg} \times d - \Delta p_s - p_r)}{\mu B (\ln r_s / r_w + S)} \quad (8)$$

мұндағы q_{max} = максималды айдау дебиті (баррель/мин); k = өткізгіштік (мД); h = тиімді қабат қалыңдығы (футы); p_{fg} = жарықшақ градиенті (psi/ft); d = ТВД (футы); Δp_s = қысым депрессиясы (әдетте 200-ден 500 фунтқа дейін кв. дюйм) (psi); p_r = қабат қысымы (psi); μ = айдау сұйықтығының тұтқырлығы (сП); B = көлемдік коэффициент (рез. барр./СТБ); r_s = ұңғы радиусы (футов); r_w = өнімді қабат радиусы (футов); S = скин фактор;

Жарықшақ градиентін келесі тәуелділіктен де бағалауға болады [20].

$$P_{fg} = \frac{\vartheta}{1-\vartheta} (\sigma_v - p) + p \tag{9}$$

мұндағы P_{fg} = Жарықшақ градиенті (psi/ft); v = коэффициент Пуассона = 0,25; σ_v = жарықшақ пайда болатын қымыс (psi) = 1,1 (psi/ft) x глубина (ft); p = кеуекті орта қысымы (psi);

Рұқсат етілген максималды беттік қысымды келесі өрнек бойынша анықтауға болады

$$P_s = P_{fg} \times d - P_h + P_f \tag{10}$$

мұндағы P_s = максималды саға қысымы (psi); P_{fg} = жарықшақ градиенті (psi/ft); d = перфорация тесіктері диаметрі (футы); P_h = гидростатикалық қысым (psi); P_f = НКТ құбыры бойындағы үйкеліс қысымы (psi);

Қышқыл көлемін есептеу:

$$V_{HCl} = 7.48 \frac{\pi(1-\varphi)X_{HCl}[r_s^2 - r_w^2]}{\beta} \tag{11}$$

$V(15\%) = 0.206$

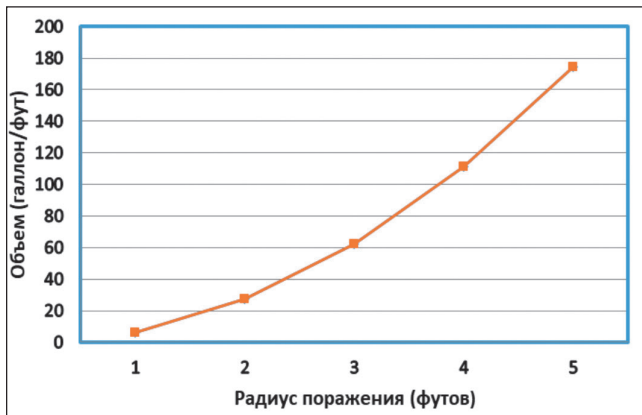
$X_{HCl}(15\%) = 0,082$

$$V_{HCl} = 7.48 \frac{\pi(1-0.25)0,082[r_s^2 - 0.328^2]}{0.206} \tag{12}$$

Бұл теңдеу ұңғыманың түп аймағын тазалау үшін қажетті қышқыл көлемін анықтауға көмектеседі (сурет 6).

Кесте 3 – Қышқылдың айдалатын көлемінің қабатқа ену жылдамдығына қатынасы

| r_s (фут) | V (галлон/фут) |
|-------------|----------------|
| 1 | 6.2 |
| 2 | 27.2 |
| 3 | 62.2 |
| 4 | 111.2 |
| 5 | 174.2 |



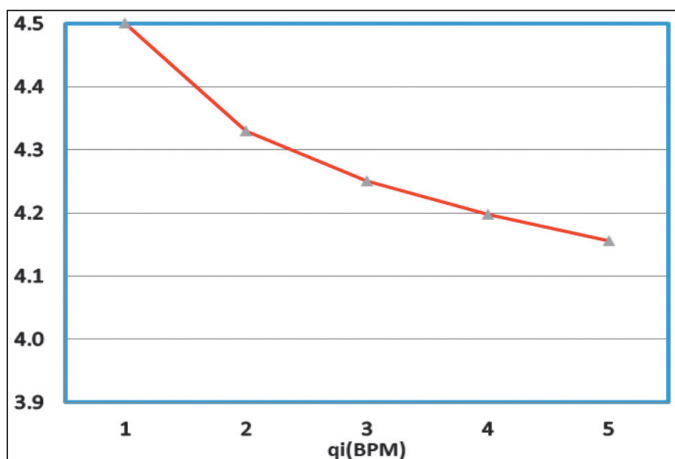
Сурет 6 – Ұңғыманың түп аймағын тазалау үшін қажетті қышқыл көлемі (галлон/фунт)

Айдау жылдамдығының скин-факторының күйіне әсері:

$$\Delta S = -\frac{1}{1.6} \ln \left[1 + 5.81 \times 10^4 \left(\frac{2,648 \cdot 10^3}{0.03048} \right)^{-0.333} \right] = -4.5 \quad (13)$$

Кесте 4 – Скин-факторының қышқылды айдау жылдамдығына қатынасы

| ΔS | q_i (BPM) |
|------------|-------------|
| -4.5 | 1 |
| -4.33 | 2 |
| -4.25 | 3 |
| -4.198 | 4 |
| -4.156 | 5 |



Сурет 7 – Скин-факторының төмендеуінің айдау жылдамдығына тәуелділік графигі

7-8 суретте қышқылдың айдау жылдамдығына байланысты скин-факторының төмендеуі көрсетілген.

Максималды айдау жылдамдығы:

$$q_{imax} = \frac{(4.917 \times 10^{-6}) kh [g_f H - (P_{safe} - P)]}{uB \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S \right]} \quad (14)$$

$$q_{imax} = \frac{(4.917 \times 10^{-6}) \times 100 \times 50 \times [7000 - (200 - 5000)]}{1.1 \times 1 \left[\ln \left(\frac{1053}{0.328} \right) + 9.5 \right]} = 2.79 \text{ BPM} \quad (15)$$

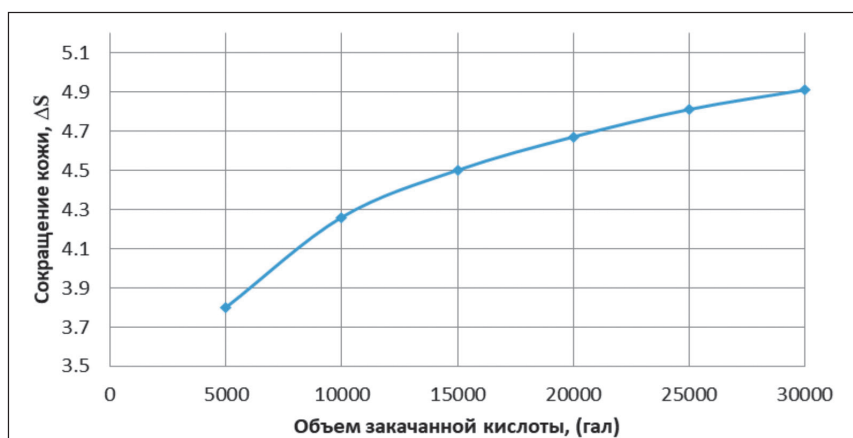
Скин-фактордың қышқыл көлеміне әсері: жалпы қабылданған айдау жылдамдығы 1 уд/мин.

$$\Delta S = -\frac{1}{1.6} \ln [1 + 23.2 \times V] \quad (16)$$

$$\Delta S = -\frac{1}{1.6} \ln [1 + 23.2 \times 37.9] = -4.26 \quad (17)$$

Кесте 5 – Скин-факторының айдалатын қышқыл көлеміне қатынасы

| ΔS | V (галлон) |
|------------|------------|
| -3.8 | 5000 |
| -4.26 | 10000 |
| -4.5 | 15000 |
| -4.67 | 20000 |
| -4.81 | 25000 |
| -4.91 | 30000 |



Сурет 8 – Скин-фактор азаюының енгізілген қышқыл көлеміне тәуелділігі графигі

Қорытынды. Бұл мақалада ерітінді тәсіліне негізделген карбонаттарды қышқылмен өңдеу бойынша бар әдеби деректер талданды. Сондай-ақ қышқылды өңдеуге арналған сұйықтықтарды талдау, қоспаларды таңдау, карбонаттарды қышқылмен өңдеуді дұрыс жобалауға көмектесу үшін модельдеу процедуралары жүргізілді.

Теориялық тұрғыдан мұндай модельдер қышқылды өңдеудің тиімділігін болжау үшін ұсынылады, бірақ бұл кен орнында ынталандыру үшін дәлелденген нақты бір шама емес. Негізгі ауданның ұңғыма бетінің ауданына қатынасына зертханалық оңтайлы дебитті масштабтау әдеттегі өңдеу мәндеріне сәйкес келетін шама тәртібін бермейді. Қазіргі уақытта модельдер саңылауларының басым енуін есептеу үшін құбыр геометриясын қолдануды және саңылауларының тығыздығын енгізу арқылы саңылауларының бәсекелестігін ескеруді ұсынады, бұл тау жыныстарының құрылымы мен айдау жағдайларына өте сезімтал болуы керек. Скин факторды бағалау үшін ұңғыма тренажерларының жанында кеуектілік-өткізгіштік қасиеттері ескере отырып, басым саңылауының ұзындығын болжаудың орнына қышқыл айдау нәтижесінде пайда болатын өткізгіштікті бағалауға жүгінген дұрыс. Алайда, еру коэффициентінің бірінші сатысында есептеусіз өткізгіштікті бағалауға қол жеткізу мүмкін емес. Осы зерттеудің талдау нәтижелері айдау жылдамдығы тау жыныстарындағы саңылауларының таралуына, сондай-ақ зертханалық эксперименттер арқылы алынған бастапқы орташа кеуектілікке, қабаттың біртектілігіне және жыныстық барлық өлшемдерге әсер ететінін көрсетеді. Айдау жылдамдығын өзгерте отырып, оны қабаттың барлық кемшіліктерін жою үшін басымды қолданатын шама

деп санауға болады. Модельдеу нәтижелері қышқыл айдаудың бүкіл процедурасына, әсіресе арнаны бұру немесе баяулататын агенттердің бір бөлігін қосу арқылы ішінара бақылауға болатын саңылауларының таралу бағытына қабаттың әртүрлі ойық немесе жарықшақ аймақтарының көбеюіне әсерін тигізе алады. 🌐

Алғыс. Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігі Ғылым Комитетінің қаржылық қолдауымен жүргізілді (AP23484034 Күрделі жағдайларда ұңғыма қабырғаларын бекіту кезінде сапаны, тәуекелді жағдайларды және шешім қабылдауды бағалау әдістемесін әзірлеу).

ӘДЕБИЕТ

- 1 Ахметзянов Р.Р. Обзор некоторых методик и результатов исследований в системе «скважина – пласт» // Нефть и газ. – 2023. – № 4. – С. 27-41. [Ahmetzyanov R.R. Obzor nekotorykh metodik i rezul'tatov issledovaniy v sisteme «skvazhina – plast» // Neft' i gaz. – 2023. – № 4. – S. 27-41.]
- 2 Imansakipova Z.B., Buktukov N.S., Imansakipova B.B. Pressure distribution in the oil reservoir in a two-dimensional plane // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2023. – № 1. – P. 38–45.
- 3 Bimagambetov K.B., Logvinenko A. Experimental studies of chemical and technological characteristics of cross-linked polymer systems applied in flow-diversion technologies // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2021. – № 4(448). – P. 50–58.
- 4 Buktukov N., Mergenov M. Improvement of oil field development using enhanced oil recovery methods // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 6. – P. 23–28.
- 5 Efendiyev G.M., Tuzelbayeva S.R., Imansakipova Z.B. Study of the Rheological Characteristics of Sediment-Gelling Compositions for Limiting Water Inflows // MDPI Applied Sciences. – 2023. – № 13(18). – P. 1-16. <https://doi.org/10.3390/app1318104736>.
- 6 Al-Murayri Mohammed T., Hassan Ibrahim, Alajmi Naser, Nesbit Jimmy, They Bastien, Al Khoury, Philippe, Zaitoun, Alain, Bouillot, Jerome, Salehi, Nazanine, Pitts, Malcolm J., Wyatt, Kon, and Elio S. Dean. Field Implementation of In-Depth Conformance Gel Treatment Prior to Starting an ASP Flooding Pilot // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2021. doi: <https://doi.org/10.2118/207850-MS>
- 7 Мухаметшин В.В., Бахтизин Р.Н., Кулешова Л.С. и др. Скрининг и оценка условий эффективного применения методов увеличения нефтеотдачи высокообводненных залежей с трудноизвлекаемыми запасами // SOCAR Proceedings. – 2021. – С. 48-56. [Muhametshin V.V., Bahtizin R.N., Kuleshova L.S. i dr. Skringing i ochenka uslovij effektivnogo primeneniya metodov uvelicheniya nefteotdachi vysokoobvodnennykh zalezhej s trudnoizvlekaemyymi zapasami // SOCAR Proceedings. – 2021. – S. 48-56.]
- 8 Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Сафарова Е.А. Внедрение комплексных научно-технических программ на поздних стадиях эксплуатации нефтегазовых месторождений // SOCAR Proceedings. – 2022. – № 2. – С. 1-8. [Dmitrievskij A.N., Eremin N.A., Safarova E.A. Vnedrenie kompleksnykh nauchno-tekhnicheskikh programm na pozdnykh stadiyah ekspluatatsii neftegazovykh mestorozhdenij // SOCAR Proceedings. – 2022. – № 2. – S. 1-8.]
- 9 Bai Y., Xiong C., Wei F. et al. Gelation study on a hydrophobically associating polymer/polyethyleniminegel system for water shut-off treatment // Energy & Fuels. – 2015. – Vol. 29(2). – P. 447-458.
- 10 Грищенко В.А, Рабаев Р.У и др. Методический подход к определению оптимальных геолого-технологических характеристик при планировании ГПП на многопластовых

- объектах // SOCAR Proceedings. – 2021. – SI2. – С. 182-191. [Grishchenko V.A, Rabaev R.U i dr. Metodicheskij podhod k opredeleniyu optimal'nyh geologo-tehnologicheskikh harakteristik pri planirovanii GRP na mnogoplastovyh ob'ektah // SOCAR Proceedings. – 2021. – SI2. – S. 182-191.]
- 11 Лятифов Я.А. Нестационарное воздействие термоактивной полимерной композицией для глубинного выравнивания профиля фильтрации // Scientific Petroleum. – 2021. – № 1. – С. 25-30. [Lyatifov YA.A. Nestacionarnoe vozdejstvie termoaktivnoj polimernoj kompoziciej dlya glubinnogo vyvavnivaniya profilya fil'tracii // Scientific Petroleum. – 2021. – № 1. – S. 25-30.]
 - 12 Мирзаджанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 229 с. [Mirzadzhanzade A.H, Stepanova G.S. Matematicheskaya teoriya eksperimenta v dobyche nefi i gaza. – М.: Nedra, 1977. – 229 с.]
 - 13 Носков С.И Сравнительная оценка значимости предикторов при использовании различных методов идентификации параметров регрессионной модели // Известия ТузГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 228-230. [Noskov S.I Sravnitel'naya ocenka znachimosti prediktorov pri ispol'zovanii razlichnyh metodov identifikacii parametrov regressionnoj modeli // Izvestiya TuzGU. Tehnicheskije nauki. – 2021. – Vyp. 9. – S. 228-230.]
 - 14 Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 76 с. [Protod'yakonov M.M., Teder R.I. Metodika racional'nogo planirovaniya eksperimentov. – М.: Nauka, 1970. – 76 с.]
 - 15 Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Давыдов А.В. Проблемы трансформации запасов углеводородного сырья в нерентабельную техногенную категорию трудноизвлекаемых // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 4. – С. 38-43. [Shahverdiev A.H., Arefev S.V, Davydov A.V. Problemy transformacii zapasov uglevodorodnogo syr'ya v nerentabel'nuyu tekhnogennuyu kategoriyu trudnoizvlekaemyh // Neftyanoe hozyajstvo. – 2022. – № 4. – S. 38-43.]
 - 16 Каширина К.О., Эпов И.Н. Обзор отечественного и зарубежного опыта применения потооклоняющих технологий // Научный форум Сибирь. – Тюмень: 2016. – Т. 2, №1. – С. 8-10. [Kashirina K.O, Eпов I.N. Obzor otechestvennogo i zarubezhnogo opyta primeneniya potooklonyayushchih tekhnologij // Nauchnyj forum Sibir'. – Tyumen': 2016. – T. 2, №1. – S. 8-10.]
 - 17 Иванов В.А., Числов А.Д., Желтов Ю.В., Рыжик В.М., Ентов В.М. Результаты опытной закачки полимерного раствора на месторождении Казахстана // Нефтяное хозяйство. – 1978. – №9. – С. 37-38. [Ivanov V.A., Chislov A.D., Zheltov YU.V, Ryzhik V.M., Entov V.M. Rezul'taty opytnoj zakachki polimernogo rastvora na mestorozhdenii Kazahstana // Neftyanoe hozyajstvo. – 1978. – №9. – S. 37-38.]
 - 18 Стреков А.С., Койлыбаев Б.Н. Исследование реологических характеристик полимерных растворов, применяемых на месторождениях Казахстана. Геологические и технологические аспекты разработки месторождений трудноизвлекаемых углеводородов // Материалы международной научно-практической конференции. – Актау, 2019. – С. 28-31. [Strekov A.S., Kojlybaev B.N. Isledovanie reologicheskikh harakteristik polimernyh rastvorov, primenyaemyh na mestorozhdeniyah Kazahstana. Geologicheskie i tekhnologicheskie aspekty razrabotki mestorozhdenij trudnoizvlekaemyh uglevodorodov // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Aktau, 2019. – S. 28-31.]
 - 19 Салаватов Т.Ш., Сулейманов Б.А., Нуряев А.С. Селективная изоляция притока жестких пластовых вод в добывающих скважинах // Нефтяное хозяйство. – 2000. – №12. – С. 81-83. [Salavatov T.SH., Sulejmanov B.A., Nuryaev A.S. Selektivnaya izolyaciya pritoka zhestkikh plastovyh vod v dobyvayushchih skvazhinah // Neftyanoe hozyajstvo. – 2000. – №12. – S. 81-83.]
 - 20 Wei W., Varavei A., Sepehrnoori K. Modeling and Analysis on the Effect of Two-Phase Flow on Wormhole Propagation in Carbonate Acidizing // SPE J. – 2017. – N 6. – P. 2067–2083.. <https://doi.org/10.2118/186111-PA>.