

SHOLI POHOLI VA TO'QIMACHILIK CHIQINDILARI SELLYULOZASI ASOSIDAGI K-PAC-KMC KOMPOZITNING BURG'ULASH ERITMALARIDA OPTIMALLASHTIRILISHI VA LABORATORIYA-AMALIY VALIDATSIYASI

Shuxrat Baxtiyorovich Davlatov¹, Dilnavoz Kumakovna Qorayeva², Shuxratqodir Tashmatovich G'ulomov^{1,*}

¹ Toshkent kimyo-texnologiya instituti, Toshkent, O'zbekiston.

² Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi, Qarshi, O'zbekiston.

* Corresponding author: shuhratrict@gmail.com

ARTICLE INFO

Dates:
Received: 12.08.2026
Revised: 21.08.2026
Accepted: 28.08.2026
DOI:
10.66960/jof.3093-8899.00037
Copyright:
CC BY 4.0

ANNOTATSIYA

Sholi poholi va to'qimachilik korxonalarining tabiiy tolali chiqindilaridan ajratilgan selluloza asosida K-PAC-KMC kompozit stabilizatorini olish va burg'ulash eritmalarida laboratoriya-amaliy baholash natijalari tizimlashtirildi. C1-C4 formulatsiyalar namlik, asosiy modda, eruvchanlik, pH, suv qaytarish va polimerlanish darajasi bo'yicha qiyoslandi. C4 uchun namlik 5%, asosiy modda 83%, eruvchanlik 98,8%, suv qaytarish 3,2 cm³/min va DP=1050 bo'ldi. C1 ga nisbatan suv qaytarish 23,8% kamaydi, DP 56,7% oshdi. Teng vaznli min-max integral indeks C4 ni ISI=1,000 bilan birinchi o'ringa qo'ydi. FTIR natijalari selluloza efiri/karboksil funksionallashtirishini, dissertatsiya TGA/XRD ma'lumotlari esa qo'shimcha termik va amorf-kristall dalillarni ko'rsatdi. Kompozitlar 120-150 °C termik-geologik model sharoitida baholangan. 2024-yilda Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasida rasmiylashtirilgan ma'lumotnoma va dalolatnoma natijalarning sinov-tajriba asosida qo'llanganini hamda ishlab chiqarishga tatbiq etish tavsiya qilinganini tasdiqlaydi. Maqolada tayyorlash, sirkulyatsiya, qattiq fazani ajratish va reologiya/API/HPHT/aging/shale nazoratini birlashtiruvchi texnologik sxema berildi; HPHT bloki mavjud tarixiy o'lchov sifatida emas, keyingi standart kvalifikatsiya moduli sifatida talqin qilindi.

Kalit so'zlar: sholi poholi; to'qimachilik chiqindisi; selluloza efiri; K-PAC; KMC; burg'ulash eritmasi; filtratsiya; termobarqorlik; laboratoriya-amaliy validatsiya; ko'p mezonli optimallashtirish.

АННОТАЦИЯ

Систематизированы результаты получения и лабораторно-практической оценки композитного стабилизатора K-PAC-KMC на основе целлюлозы рисовой соломы и натуральных волокнистых отходов текстильных предприятий. Сопоставлены составы C1-C4 по влажности, содержанию основного вещества, растворимости, pH, показателю водоотдачи и степени полимеризации. Для C4 установлены влажность 5%, содержание основного вещества 83%, растворимость 98,8%, показатель водоотдачи 3,2 см³/мин и степень полимеризации 1050. По сравнению с C1 водоотдача снизилась на 23,8%, а степень полимеризации увеличилась на 56,7%. Интегральный min-max индекс с равными весами поставил C4 на первое место (ISI=1,000). FTIR подтвердил функциональную модификацию целлюлозы; данные TGA/XRD диссертационной работы использованы как дополнительные термические и структурные доказательства. Композиции оценивались при 120-150 °C на геологической модели. Справка и акт опытного применения, оформленные в 2024 г. Шуртанским нефтегазодобывающим управлением, подтверждают опытное применение результатов и рекомендацию к внедрению. Представлена технологическая схема приготовления, циркуляции, удаления твердой фазы и параллельного контроля реологии, API/HPHT-фильтрации, термостабилизации и shale-recovery; HPHT рассматривается как последующий модуль стандартной квалификации, а не как исторически измеренный результат.

Ключевые слова: рисовая солома; текстильные отходы; эфир целлюлозы; K-PAC; KMC; буровой раствор; фильтрация; термостабильность; лабораторно-практическая валидация; многокритериальная оптимизация.

ABSTRACT

A laboratory-to-practical validation study was conducted for a K-PAC-KMC composite stabilizer derived from rice-straw and natural-fiber textile-waste cellulose. Four formulations (C1-C4) were compared using moisture, active-matter content, water solubility, pH, water-return index and degree of polymerization (DP). C4 showed 5% moisture, 83% active matter, 98.8% solubility, a water-return index of 3.2 cm³/min and DP=1050. Relative to C1, water return decreased by 23.8% and DP increased by 56.7%. An equal-weight min-max multi-criteria index ranked C4 first (ISI=1.000). FTIR supported cellulose-ether/carboxyl functionalization, while dissertation TGA/XRD data provided complementary thermal and amorphous-crystalline evidence. The formulations were also evaluated under 120-150 °C thermal/geological-model conditions. A 2024 certificate and trial act issued by the Shurtan Oil and Gas Production Department document experimental application and recommendation for production implementation. A technological circuit combining preparation, circulation, solids separation and parallel rheology/API/HPHT/aging/shale-control modules is presented; HPHT is explicitly treated as a subsequent standard-qualification module rather than as historical measured data. The combined evidence identifies C4 as the most balanced formulation and establishes a technically defensible basis for further ISO/API qualification and scale-up.

Keywords: rice straw; textile waste; cellulose ether; K-PAC; CMC; drilling fluid; filtration control; thermal stability; laboratory-to-practical validation; multi-criteria optimization.

How to cite:

Davlatov Sh.B., Qorayeva D.K., Gulomov Sh.T. (2026). SHOLI POHOLI VA TO'QIMACHILIK CHIQINDILARI SELLYULOZASI ASOSIDAGI K-PAC-KMC KOMPOZITNING BURG'ULASH ERITMALARIDA OPTIMALLASHTIRILISHI VA LABORATORIYA-AMALIY VALIDATSIYASI. *Journal of Future*, 2(5), 6-13. <https://doi.org/10.66960/jof.3093-8899.00037>

1. Kirish

Neft va gaz quduqlarini burg'ulashda burg'ulash eritmasining vazifasi faqatgina jins parchalari (cuttings)ni sirtga olib chiqish bilan cheklanmaydi. U quduq tubini sovitadi va moylaydi, gidrostatik bosimni boshqaradi, burg'ulangan jinslarni suspenziyada ushlab turadi, quduq devoriga filtrat kirib borishini chegaralaydi va ingichka, kam o'tkazuvchan filtr qobig'i hosil qiladi. Ayniqsa, suvga sezgir slanetslar, yuqori haroratli qatlamlar va mineralizatsiyalangan qatlam suvlari mavjud bo'lgan sharoitda burg'ulash eritmasining reologik-filtratsion barqarorligi quduqning geomekanik barqarorligi bilan bevosita bog'liq.

Suv asosidagi burg'ulash eritmalarini ekologik va iqtisodiy afzalliklarga ega bo'lsa-da, suvning gil minerallari bilan o'zaro ta'siri shishish, dispersiyalanish, filtrat invaziyasi va qobiqning qalinlashishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli CMC, PAC, HEC, modifikatsiyalangan kraxmal, lignin hosilalari va selluloza nanoformalari kabi polimerlar filtratsiyani boshqaruvchi hamda reologiyani modifikatsiyalovchi qo'shimcha sifatida qo'llanadi. 2024-yilgi keng qamrovli sharhda selluloza hosi-

lalarining bentonit bilan gidratlangan tarmoq hosil qilishi, filtr qobig'i g'ovakligini kamaytirishi va slanets yuzasida suv invaziyasini cheklashi ularning asosiy funksional mexanizmi sifatida ko'rsatilgan [1].

Yuqori harorat tabiiy polimerlarga qo'yiladigan eng qattiq cheklavlardan biridir. 150 °C va undan yuqori sharoitlarda glikozid zanjirining parchalanishi, oksidlanish, gidroliz va ion ekranlanishi natijasida viskozlik hamda adsorbsiya qobiliyati pasayishi mumkin. Shu sababli sertifikat-siya, graft-polimerizatsiya, aromatik yoki sulfonat guruhlarini kiritish, nanozarrachalar bilan komplekslash kabi yondashuvlar yuqori haroratli suv asosidagi eritmalar uchun rivojlantirilmoqda [2,5-7]. 2025-yilda turli PAC variantlarining qiyosiy bahosida PAC turi va kombinatsiyasi filtratsiya natijasini sezilarli belgilashi ko'rsatilgan [3].

Mahalliy sellulozali xomashyoni — sholi poholi va to'qimachilik korxonalarining paxta tolali chiqindilarini — chuqur qayta ishlash ikki masalani bir vaqtning o'zida hal qiladi: chiqindi oqimini kamaytiradi va import qilinadigan burg'ulash reagentlari uchun mahalliy xomashyo bazasini yaratadi. To'qimachilik paxta chiqindisidan CMC sin-tezi bo'yicha zamonaviy ishlar yuqori eruvchanlik va nazorat qilinadi-

gan almashinish darajasiga ega mahsulot olish mumkinligini tasdiqlagan [8]. Biroq xomashyo manbaini ko'rsatishning o'zi ilmiy yangilik uchun yetarli emas; reagentning tarkib-struktura-xossa-amaliy samaradorlik bog'lanishi tajriba bilan isbotlanishi kerak.

Mazkur ishning maqsadi sholi poholi va to'qimachilik tolali chiqindilardan olingan selluloza asosida K-PAC-KMC kompozit stabilizatorini shakllantirish bo'yicha eksperimental natijalarni tizimlashtirish, C1-C4 formulatsiyalar ichidan optimal tarkibni ko'p mezonli matematik baholash orqali aniqlash, strukturaviy va termik dalillar bilan tarkib-xossa bog'lanishini izohlash hamda burg'ulash eritmasini tayyorlash-sirkulyatsiya-nazorat-dala sinovi bosqichlarini yagona laboratoriya-amaliy validatsiya konturiga birlashtirishdan iborat.

2. Materiallar va tadqiqot usullari

2.1. Tadqiqot dizayni, gipoteza va ilmiy yangilik

Tadqiqotning markaziy gipotezasi va ilmiy yangiligi quyidagi eksperimental mantiqqa asoslandi:

- mahalliy ikki xil sellulozali ikkilamchi xomashyo — sholi poholi va to'qimachilik tolali chiqindilari — modifikatsiyalangan selluloza efiri va kompozit stabilizator platformasida birlashtirildi;
- K-PAC-KMC tizimida selluloza hosilasi, lignin, tolali selluloza va baritning birgalikdagi ta'siri to'rtta C1-C4 formulatsiya orqali tizimli qiyoslandi;
- optimal formulatsiya bitta ko'rsatkich bilan emas, balki namlik, asosiy modda, eruvchanlik, suv qaytarish va polimerlanish darajasini birlashtiruvchi o'lchovsiz integral samaradorlik indeksi orqali tanlandi;
- xomashyo → modifikatsiya → strukturaviy tavsif → C1-C4 skrining → termik/geologik baholash → ishlab chiqarish sinovi zanjiri yagona laboratoriya-amaliy validatsiya modeli sifatida tahlil qilindi.

2.2. Xomashyo va sellulozani ajratib olish

Sholi poholi 5–8 cm o'lchamli fraksiyalarga maydalandi. Dissertatsiya materiallaridagi optimallashtirish natijalarida 40 g/L NaOH, taxminan 210 min pishirish va 180 °C atrofidagi rejim selluloza ajratish uchun maqbul ishchi sharoit sifatida keltirilgan. Ishqoriy pishirishdan so'ng qattiq selluloza fazasi ajratildi, yuvildi va quritildi. To'qimachilik korxonalarining tabiiy paxta tolali qirqim chiqindilari esa ishqoriy tozalash orqali yog'-mum va boshqa no-sellyulozali komponentlardan tozalandi. Manba tajribalarida to'qimachilik chiqindisi sellulozasining yuqori polimerlanish darajasi uning uzun makromolekulyar zanjirli xomashyo ekanini ko'rsatgan.

2.3. K-PAC va KMC hosilalarini olishning kimyoviy asosi

Sellyuloza dastlab NaOH muhitida alkalizatsiya qilinib, gidroksil guruhlarining reaksiyon faolligi oshirildi. Keyingi eterifikatsiya/modifikatsiya bosqichida monoxlorosirka kislotasi yoki monoxloroatsetat hamda manba texnologiyasida ko'rsatilgan propilenoksid tipidagi funksionallashtiruvchi reagentlardan foydalanilgan. Dissertatsiyada laboratoriya ishchi oynasi pH 7–9, 60–80 °C va 1–3 soat, texnologik masshtablash uchun esa 60–75 °C va 2–3 soat sifatida berilgan. Jarayonning kimyoviy mohiyati selluloza –OH guruhlarini eterifikatsiya qilib, suv bilan kuchli o'zaro ta'sirlanuvchi karboksimetil va propil/gidroksipropil xarakterdagi yon guruhlarni kiritishdan iborat.

Terminologik aniqlik. Manba hujjatlarida K-PAC atamasi "karboksil-propilsellyuloza" va "karboksimetil-propilsellyuloza" shakllarida qo'llangan. Shu sababli ushbu maqolada K-PAC muallifning tajriba markasi sifatida saqlanadi va kimyoviy jihatdan karboksil/propil funksiyali modifikatsiyalangan selluloza efiri deb talqin qilinadi; bu belgi kaliyli polianion selluloza nomining qisqartmasi sifatida ishlatilmaydi.

2.4. Kompozit formulatsiyalar

Burg'ulash eritmasini stabilizatsiya qilish uchun to'rtta kompozit formulatsiya tayyorlandi. Manba tajriba jadvallarida qo'shimcha kom-

ponentlarning berilgan ulushlari va selluloza manbalari nisbati C1-C4 bo'yicha bosqichma-bosqich o'zgartirilgan. Ushbu qator formulatsiyalarni qiyosiy skrining qilish uchun qo'llanadi; komponentlarning individual sababiy hisssasi esa alohida faktorial dizayn bilan ajratilmagan.

*Izoh: * C1-C4 uchun qo'shimcha komponentlarning massaviy ulushlari manba dissertatsiya jadvalidagi ko'rinishda saqlangan; arxiv materialida bazaviy K-PAC/KMC polimer fazasini 100% gacha to'ldiruvchi alohida balans qatori keltirilmagan. Shu sababli jadval formulatsion skrining ma'lumoti sifatida talqin qilinadi. ** Oxirgi qator sholi poholi sellulozasi va to'qimachilik sellulozasi manbalari nisbatini bildiradi.*

2.5. Fizik-kimyoviy va funksional sinovlar

Sintezlangan namunalarda namlik, asosiy modda massaviy ulushi, suvda eruvchanlik, pH, polimerlanish darajasi va asosiy modda hisobiga 0,75 mass.% KMC saqlovchi tuproqli model eritmasining suv qaytarish ko'rsatkichi aniqlangan. Manba jadvalarida suv qaytarish birligi cm³/min ko'rinishida berilgan; shu sababli ushbu maqolada u API 30-min fluid-loss qiymati bilan tenglashtirilmaydi va C1-C4 ni ichki qiyosiy skrining qilish ko'rsatkichi sifatida ishlatiladi.

Mahsulotni xalqaro burg'ulash reagentlari sinfiga chiqarish uchun ISO 13500 PAC/CMC materiallarining spetsifikatsiya va sinovlarini, API RP 13I esa laboratoriya burg'ulash suyuqliklari sinovlarini referens sifatida beradi [11,12]. API RP 13B-1 suv asosidagi burg'ulash eritmalarini dala sharoitida baholash metodikasini belgilaydi [13]. Mazkur standartlar tarixiy tajriba natijalarini qayta nomlash uchun emas, C4 formulatsiyasining keyingi tijoriy kvalifikatsiya bosqichi uchun mezon sifatida qabul qilindi.

2.6. FTIR, TGA va XRD tahlili

FTIR spektrlarda 3304 cm⁻¹ atrofidagi keng signal O–H guruhlariga; 2914–2849 cm⁻¹ oralig'i alifatik C–H guruhlariga; 1727 cm⁻¹ yaqinidagi signal karbonil/karboksil C=O tebranishlariga; 1553 va 1394 cm⁻¹ diapazoni karboksilat guruhlarining asimmetrik va simmetrik tebranishlariga; 1210–1022 cm⁻¹ oralig'i esa C–O–C va C–O bog'lariga taalluqli deb talqin qilindi. Ushbu belgilar alkalizatsiya-eterifikatsiyadan so'ng sellulozoda yangi ionogen/eter funksional guruhlar shakllanganini ko'rsatadi. 2382 cm⁻¹ atrofidagi signal atmosfera CO₂ si bilan bog'liq artefakt bo'lishi mumkin va strukturaviy dalil sifatida ishlatilmaydi. Tegishli tajriba spektrlari 1-rasmda keltirilgan.

Dissertatsiyaning TGA/DTG tahlilida 306, 348 va 381 °C atrofidagi xarakterli termik zonalar qayd etilgan; XRD tahlilida esa 45–55% atrofidagi kristallik darajasi keltirilgan. Bu natijalar modifikatsiyalangan selluloza-lignin tizimining amorf-kristall va ko'p bosqichli termik xatti-harakatini ko'rsatadi. Biroq TGA parchalanish harorati burg'ulash eritmasidagi reologik saqlanish harorati bilan aynan bir tushuncha emas. Shu sababli strukturaviy-termik ma'lumotlar 120–150 °C funksional sinovlar bilan birgalikda talqin qilindi.

2.7. Matematik ma'lumotlarni qayta ishlash

Formulatsiyalar soni n=4 bo'lib, manba hujjatlarida individual takroriy o'lchovlar qatori saqlanmagan. Shu sababli p-qiymat yoki ANOVA kabi inferensial statistika sun'iy ravishda hisoblanmadi. Qiyoslash uchun (i) nisbiy o'zgarish, (ii) Pareto ustunlik va (iii) teng vaznli min-max integral samaradorlik indeksi (ISI) qo'llandi. Bu usul o'lchangan yakuniy qiymatlar asosida kompozitsiyalarni shaffof va qayta hisoblanadigan tarzda saralash imkonini beradi.

Foydali ko'rsatkichlar (asosiy modda A, eruvchanlik S, polimerlanish darajasi DP) uchun normalizatsiya:

$$z_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j)$$

Kam bo'lishi maqsadga muvofiq ko'rsatkichlar (namlik W va suv qaytarish F) uchun:

$$z_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j)$$

Integral indeks:

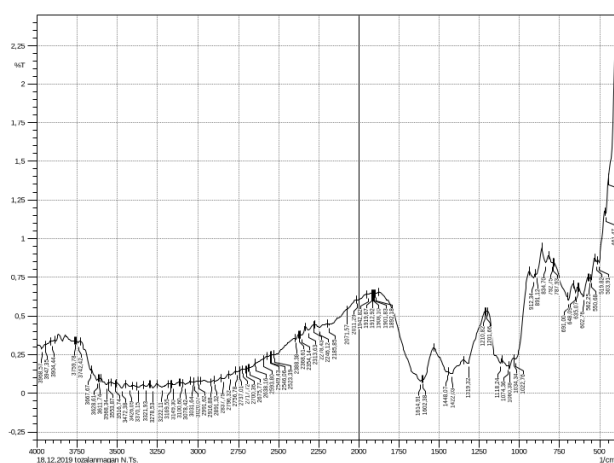
$$ISI_i = (z_{i,A} + z_{i,S} + z_{i,DP} + z_{i,W} + z_{i,F}) / 5$$

Manba hujjatlarida almashinish ko'rsatkichining 84–89 diapazonidagi qiymatlari keltirilgan, biroq uning molyar DS (0–3) ko'rinishida ifodalanganligi va aniq birligi tasdiqlanmagan. Shu sababli ushbu indika-

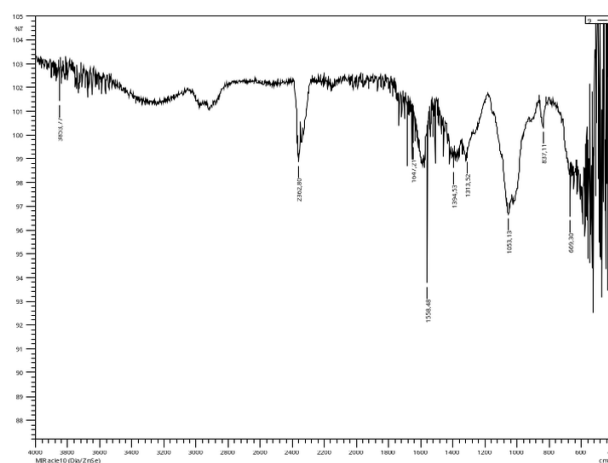
1-jadval. C1–C4 K-PAC–KMC kompozitlarining formulatsiyasi

Komponent	Birlik / ifoda	C1	C2	C3	C4
To'qimachilik tolali chiqindisi sellyulozasi (TKTCh)	mass.%*	5	8	12	15
Lignin	mass.%*	2	5	7	10
Sholi yarimsellyuloza fraksiyasi (85%)	mass.%*	2	4	6	8
Barit	mass.%*	3	5	8	10
Sholi poholi sellyulozasi + to'qimachilik sellyulozasi nisbati	nisbat**	10/90	20/80	30/70	40/60

(a) Texnik K-PAC



(b) Ekstraksiyadan keyingi K-PAC



1-rasm. Texnik K-PAC namunasining FTIR spektrlari: (a) dastlabki texnik mahsulot; (b) etil spirtida ekstraksiyadan keyingi namuna. Manba: dissertatsiyaning eksperimental materiallari.

tor maqolada “manba usuli bo'yicha almashinish ko'rsatkichi (sh.b.)” sifatida saqlanib, ISI hisobiga kiritilmadi.

3. Natijalar

3.1. Mahalliy K-PAC markalarining boshlang'ich sifat ko'rsatkichlari

Kompozitga o'tishdan oldin to'qimachilik va sholi sellyulozasi asosida olingan K-PAC markalari alohida baholangan. To'qimachilik chiqindisi asosidagi namuna yuqori polimerlanish darajasi va qovushqoqlik bilan, sholi sellyulozasi asosidagi namuna esa yuqori asosiy modda va eruvchanlik bilan ajralib turdi. Bu ikki xomashyoni kompozitlash ilmiy jihatdan mantiqiy: bir komponent molekulyar zanjir uzunligini, ikkinchisi esa eruvchanlik va tozalikni qo'llab-quvvatlaydi.

3.2. C1–C4 kompozitlarining texnologik xossalari

C1 dan C4 ga o'tishda asosiy modda 75 dan 83% gacha, polimerlanish darajasi 670 dan 1050 gacha oshdi, suv qaytarish esa 4,2 dan 3,2 cm³/min gacha kamaydi. C4 namlik bo'yicha eng past (5%) va eruvchanlik bo'yicha eng yuqori (98,8%) qiymatni berdi. C3 ning almashinish ko'rsatkichi 89 bo'lib, C4 dagi 85 dan yuqori; ammo asosiy modda, eruvchanlik, suv qaytarish, namlik va DP majmuasi C4 foydasiga natija berdi.

3.3. Nisbiy samara va ko'p mezonli optimallashtirish

Teng vaznli min–max normalizatsiya C4 ni beshta tanlangan mezon bo'yicha ISI=1,000 bilan birinchi o'ringa qo'ydi; C3=0,522, C2=0,289 va C1=0,150 bo'ldi. Mazkur indeks individual tajriba nuqtalarini “statistik ishonchlilik” bilan almashtirmaydi, balki mavjud yakuniy labora-

toriya qiymatlarini bitta o'lchovsiz texnologik reytingga birlashtiradi. C4 C1 va C2 ga nisbatan Pareto-ustun, C3 ga nisbatan esa almashinish ko'rsatkichidan tashqari tanlangan beshta mezon bo'yicha ustun bo'ldi.

3.4. Strukturaviy-termik dalillar

FTIR spektrining 1727 cm⁻¹ atrofidagi karbonil signali va 1553/1394 cm⁻¹ karboksilat juftligi sellyuloza skeletining karboksil funksiyalar bilan modifikatsiyalanganini qo'llab-quvvatlaydi. 2914–2849 cm⁻¹ dagi alifatik C–H signallarining kuchayishi propil/hidroksipropil xarakterdagi yon guruhlarni ishtiroki bilan mos keladi. 1053 cm⁻¹ hamda 1210–1022 cm⁻¹ oralig'idagi C–O/C–O–C tebranishlari sellyuloza efir bog'larining saqlanganini ko'rsatadi. Shu sababli funksionalizatsiya mexanizmi “alkali cellulose → etherified carboxyl/propyl cellulose derivative” zanjiri bilan izohlanadi.

Dissertatsiyadagi TGA ma'lumotlarida keltirilgan 306–381 °C zonalar sellyuloza–lignin qattiq skeletining termik o'zgarish diapazonini ko'rsatadi. Bu qiymatlar 120–150 °C ishchi sinov diapazonidan yuqori bo'lsa-da, ularni bevosita “150 °C da reologiya saqlanadi” degan xulosalar bilan tenglashtirish mumkin emas. C4 ning burg'ulash uchun istiqbolli aynan TGA, FTIR, suv qaytarish ko'rsatkichi va 120–150 °C termik/geologik baholashlarning birgalikdagi dalillari asosida baholandi.

3.5. Burg'ulash eritmasidagi funksional mexanizm

C4 ning suv qaytarish ko'rsatkichidagi ustunligi ko'p komponentli mexanizm bilan izohlanadi. K-PAC/KMC ning gidrosil va karboksil/karboksilat guruhlari suvni gidratatsion qobiqda ushlab, bentonit yuzasiga adsorbsiyalanishi mumkin. Yuqori DP (1050) makromolekul-

2-jadval. Xom selluloza manbasiga bog'liq K-PAC sifat ko'rsatkichlari

Ko'rsatkich	TKTCh asosidagi K-PAC	Sholi pohoли asosidagi K-PAC	Ilmiy talqin
Polimerlanish darajasi	1250	640	TKTCh — uzunroq makromolekulyar zanjir
Almashinish ko'rsatkichi (manba usuli bo'yicha), sh.b.	95	86	Har ikkisi yuqori funksionallashgan
Asosiy modda, %	85	88	Kompozit uchun yuqori faol faza
2% eritma dinamik qovushqoqligi, mPa·s	305,4	205,7	TKTCh namunasi kuchliroq viskozlashtiruvchi xususiyatga ega
Suvda eruvchanlik, %	98,4	99,2	Har ikkisi yuqori disperslanadi
pH	9	9	Ishqoriy burg'ulash tizimiga mos

3-jadval. C1–C4 kompozitlarining eksperimental sifat ko'rsatkichlari

Ko'rsatkich	C1	C2	C3	C4
Namlik, %	6	7	6	5
Almashinish ko'rsatkichi (manba usuli bo'yicha), sh.b.	85	84	89	85
Asosiy modda, %	75	78	81	83
Suvda eruvchanlik, %	98,2	98,4	98,0	98,8
pH	9	10	9	9
Suv qaytarish, cm ³ /min	4,2	4,0	3,5	3,2
Polimerlanish darajasi	670	810	920	1050

4-jadval. C4 formulatsiyasining C1 va 85/700-PO referensiga nisbatan yaxshilanishi

Ko'rsatkich	C1 → C4 o'zgarish	85/700-PO → C4 o'zgarish	Texnologik mazmun
Namlik	–16,7%	–50,0%	Saqlash va dozalanish barqarorligi
Asosiy modda	+10,7%	+31,7%	Faol polimer/kompozit ulushi ko'proq
Suvda eruvchanlik	+0,61%	+1,86%	Tezroq gidratatsiya va bir jinsli tarqalish
Suv qaytarish	–23,8%	–20,0%	Filtratsion nazoratning yaxshilanishi
Polimerlanish darajasi	+56,7%	+50,0%	Makromolekulyar tarmoq va viskozlashtirish potentsiali

5-jadval. Teng vaznli integral samaradorlik indeksi (ISI)

Formulatsiya	ISI	Rang	Qisqa baho
C1	0,150	4	Boshlang'ich kompozit
C2	0,289	3	Oraliq yaxshilanish
C3	0,522	2	Yuqori funksional daraja
C4	1,000	1	Barcha asosiy mezonlar bo'yicha optimal

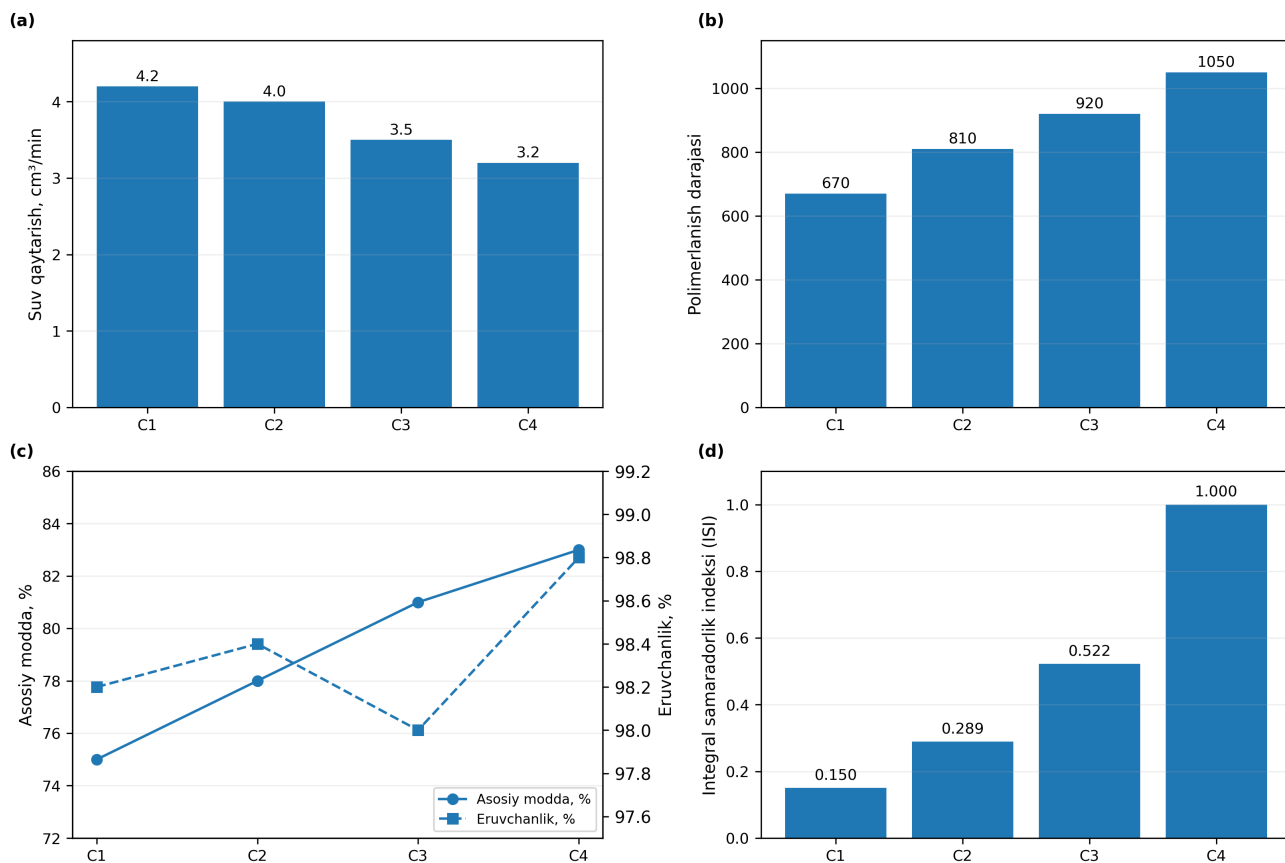
yar chirmashish va ko'priklanish ehtimolini oshiradi. Tolali selluloza va lignin filtr qobig'idagi mikrobo'shliqlarni yopuvchi organik faza, barit esa qattiq faza granulometriyasini kengaytiruvchi mineral komponent sifatida ishlaydi. Ushbu mexanizm sababiy faktorial tajriba bilan alohida komponentlar kesimida ajratilmaganligi sababli “taklif etilgan mexanizm” sifatida talqin qilinadi.

Ushbu mexanizm zamonaviy adabiyotdagi natijalar bilan uyg'un. Guo va hammualliflar selluloza nanofibrillari bentonit bilan o'zaro chirmashgan tarmoq hosil qilib, reologiya va filtratsiyani yaxshilashini ko'rsatgan [4]. Jia va hammualliflar PAC asosidagi graft-kompozitlarda anion guruhlari va gil qatlami o'rtasidagi bog'lanish zich filtr qobig'i hosil qilib, yuqori harorat/tuz sharoitida fluid loss ni nazorat qilishini ko'rsatgan [5]. 2024-yilgi PADC nanocellulose tizimi esa 0–160 °C diapazonda termik barqarorlik va slanetsga inhibitiv ta'sir ko'rsatgan [6]. Mazkur C4 ning

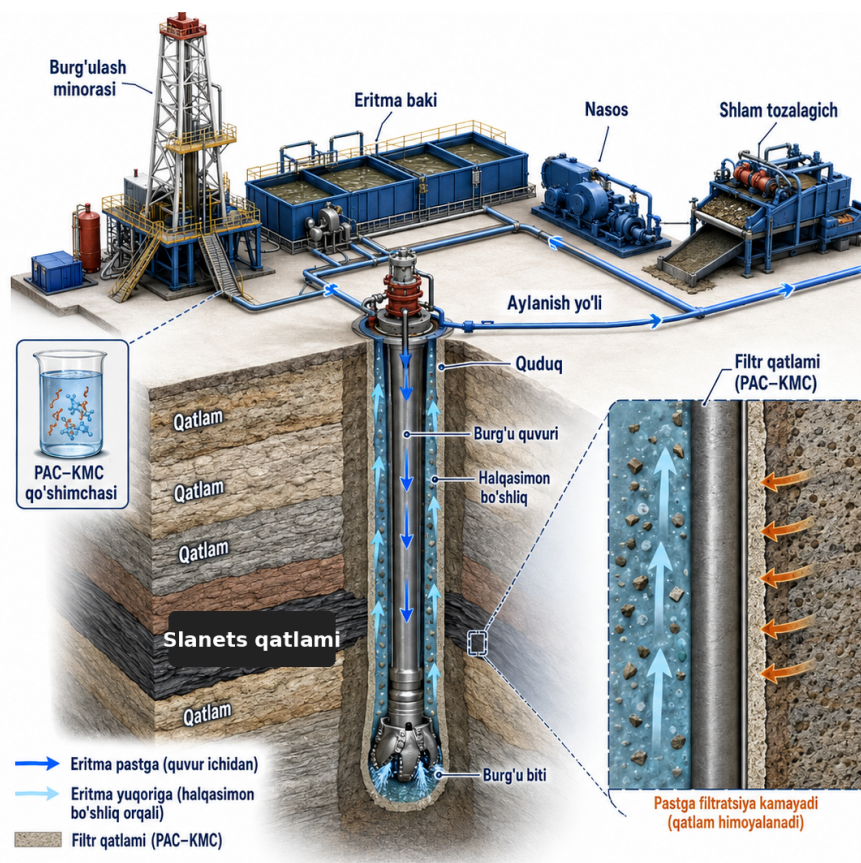
farqi — murakkab sintetik monomer tizimlari o'rniga mahalliy ikkilamchi selluloza, lignin va mineral fazani birlashtirgan soddaroq kompozitsion strategiyadir. K-PAC–KMC ning sirkulyatsion tizimdagi funksional roli va quduq devorida himoya filtr qatlamini hosil qilish konsepsiyasi 3-rasmda vizuallashtirilgan.

3.6. 120–150 °C termik va geologik model sinovlari

Eksperimental dasturda sintezlangan stabilizatorlar turli konsentrat-siyalarda burg'ulash qo'shilmalariga kiritilib, laboratoriya sharoitida real geologik model materiallari bilan tekshirilgan. Manba dissertatsiyasida fizik-mexanik, viskozimetrik va termostabil baholashlar asosida 120–150 °C gacha funksional barqarorlik ijobiy baholangan. Biroq arxivda har bir harorat uchun API HPHT 30-min filtratning to'liq xom jadvali mavjud emas. Shu sababli bu natija “termik-geologik laboratoriya val-



2-rasm. C1–C4 kompozitlarining eksperimental ko'rsatkichlari: (a) suv qaytarish; (b) polimerlanish darajasi; (c) asosiy modda va suvda eruvchanlik; (d) integral samaradorlik indeksi (ISI). Manba: 3- va 5-jadvallar asosida tuzilgan.



3-rasm. K-PAC-KMC stabilizatori ishtirokidagi suv asosidagi burg'ulash eritmasining 3D konseptual sirkulyatsiya sxemasi: quvur ichidan pastga oqim, halqasimon bo'shliq orqali qaytish va quduq devorida himoya filtr qatlaminin shakllanishi.

idatsiyasi” deb ataladi, “o’lchangan API HPHT fluid-loss natijasi” deb emas.

Maqola doirasida tadqiqotning tugallanganligi quyidagi mezonlar bilan baholandi: mahsulot sintez qilindi, C1–C4 formulatsiyalar tayyorlandi, sifat ko’rsatkichlari o’lchandi, optimal C4 matematik saralandi, FTIR/TGA/XRD bilan strukturaviy-termik tavsif berildi, 120–150 °C model sinovlari bajarildi va natijalar ishlab chiqarish sinov-tajriba hujjati bilan bog’landi. ISO/API bo’yicha to’liq sertifikatсион kvalifikatsiya esa ilmiy tadqiqotdan keyingi mahsulot standartlashtirish bosqichi hisoblanadi.

3.7. Ishlab chiqarish sinovi va amaliy validatsiya

2024-yilda Sho’rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi tomonidan rasmiylashtirilgan ma’lumotnoma va dalolatnomada Davlatov Sh.B. dissertatsiyasi natijalari boshqarmada sinov-tajriba asosida qo’llangani qayd etilgan. Hujjatda K-PAC namunalari suvda eruvchanlik, dinamik qovushqoqlik, polimerlanish darajasi, almashinish ko’rsatkichi va asosiy modda miqdori bo’yicha texnik shartlar bilan qiyoslangani; K-PAC–KMC ning to’rtta kompozit tarkibi ishlab chiqilgani; ligninni termik himoya/inhibitiv komponent sifatida qo’llash ko’rib chiqilgani va natijalar ijobiy topilib ishlab chiqarishga tatbiq etish tavsiya qilingani ko’rsatilgan. Burg’ulash eritmasini tayyorlashdan quduq modeli orqali sirkulyatsiya, qattiq fazani ajratish va parallel laboratoriya nazoratigacha bo’lgan yakuniy texnologik sinov konturi 4-rasmda keltirilgan. Rasmda API va HPHT filtr-press bloklari C4 ni keyingi standart kvalifikatsiya qilish modullari sifatida ko’rsatilgan; ular arxivda mavjud bo’lmagan HPHT natijalarini uydirma tarzda ifodalamaydi.

4. Muhokama

4.1. Tarkib-xossa bog’lanishi

C1–C4 formulatsiyalarda komponentlar bir vaqtda oshirilgani sababli har bir komponentning individual sababiy hissasini ajratish mumkin emas; bu to’liq faktorial dizayn emas. Shunga qaramay, formulatsiya qatori texnologik optimallashtirish uchun izchil trend beradi: lignin 2→10%, tolali selluloza 5→15%, sholi yarimsellyuloza fraksiyasi 2→8% va barit 3→10% gacha oshirilganda suv qaytarish kamaygan, asosiy modda va DP esa oshgan. Kelgusida individual omillar ta’sirini ajratish uchun response-surface yoki faktorial dizayn qo’llanishi maqsadga muvofiq.

C4 ning yuqori DP qiymati suv qaytarishning pasayishi bilan birga kuzatilgani makromolekulyar zanjir uzunligi filtratsion nazoratda muhim rol o’ynashini ko’rsatadi. Biroq “DP qancha katta bo’lsa shuncha yaxshi” degan umumiy xulosa noto’g’ri bo’lishi mumkin: haddan tashqari yuqori molekulyar massa plastik viskozlik va nasos energiyasini oshirishi mumkin. Shu sababli C4 ning afzalligi yuqori DP ning o’zi emas, balki yuqori eruvchanlik, nisbatan past namlik va eng past suv qaytarish bilan bir vaqtda namoyon bo’lishidir.

4.2. Adabiyot bilan qiyosiy ilmiy pozitsiya

Khan va hammualliflarning 2024-yilgi sharhi CMC/PAC va boshqa selluloza hosilalarini WBDF uchun rheology modifier, fluid-loss reducer va shale inhibitor sifatida ko’rsatadi [1]. Noor va hammualliflar 2025-yilda tabiiy polimerlarning 150 °C dan yuqori sharoitda degradatsiyasini asosiy cheklov sifatida ajratib, eterifikatsiya, graflash va ionik komplekslash orqali termik chidamlilikni oshirishni tavsiya qilgan [2]. C4 ning lignin–sellyuloza–mineral kompozit strategiyasi aynan shu “tuzilmani mustahkamlash” paradigmasiga mos keladi, biroq sintetik monomer yukini kamaytirishi bilan farqlanadi.

Saadi va hammualliflarning 2025-yilgi PAC variantlari tadqiqotida PAC turi va sinergik kombinatsiyasi filtratsion xususiyatni sezilarli o’zgartirishi ko’rsatilgan [3]. Demak, mahalliy reagentni faqat “PAC” nomi bilan baholash yetarli emas; uning aniq molekulyar arxitekturasini va kompozit fazalarining nisbati muhim. Jia va hammualliflarning PAC asosidagi nano-graft tizimi 260 °C gacha ekstremal sharoitda yuqori barqarorlikka erishgan [5], ammo bunday tizim ko’p monomerli va murakkab sintez talab qiladi. C4 esa 120–150 °C ish oynasi uchun soddaroq, mahalliy va potensial arzon formulatsiya sifatida pozitsiyalanadi.

2026-yilda e’lon qilingan termosezgir selluloza asosidagi HAAN tizimi yuqori haroratli agingdan keyin filtratsiyani nazorat qilish va tuzli muhitda ishlash qobiliyatini namoyish etgan [7]. Ushbu zamonaviy natija yuqori haroratli burg’ulashda selluloza skeletini funksional modifikatsiya qilishning istiqbolini tasdiqlaydi. Mazkur C4 tadqiqotining ilmiy qiymati esa nanopolimer yoki maxsus termosezgir monomer yaratishdan ko’ra, O’zbekiston sharoitidagi chiqindilarni amaliy polimer–lignin–mineral kompozitga aylantirish va uni ishlab chiqarish sinovigacha yetkazishidir.

4.3. Standartlashtirish va keyingi mahsulot kvalifikatsiyasi

ISO 13500 PAC/CMC turidagi burg’ulash materiallari uchun spetsifikatsiya va sinovlarni qamrab oladi [11]; API RP 13I laboratoriya burg’ulash suyuqliklarini sinash uchun metodik ramka beradi [12], API RP 13B-1 esa dala sinovlariga tegishli [13]. Shu sababli C4 ni tijoriy mahsulotga chiqarish uchun manba texnik shartlari bilan moslikdan tashqari, parallel ISO/API kvalifikatsiyasi ham o’tkazilishi kerak. 4-rasmdagi API/HPHT nazorat bloklari aynan shu keyingi standartlashtirish bosqichining texnologik interfeysi sifatida kiritilgan.

4.4. Cheklovlar va ularning ilmiy talqini

Tadqiqotning to’rtta asosiy cheklovi mavjud. Birinchidan, C1–C4 bo’yicha individual parallel o’lchovlarning xom qatori arxiv paketida yo’q; shu sababli sun’iy standart og’ish, p-qiymat yoki ANOVA kiritilmadi. Ikkinchidan, suv qaytarish ko’rsatkichi cm³/min formatida bo’lib, API 30-min fluid-loss bilan aynan bir xil emas. Uchinchidan, 120–150 °C barqarorlik bo’yicha manbada ijobiy yakuniy xulosa mavjud, lekin har bir harorat uchun oldin/keyin reologik retention jadvali saqlanmagan. To’rtinchidan, 4-rasmdagi HPHT blok standart kvalifikatsiya uchun loyihalashtirilgan modul bo’lib, uning sonli natijalari ushbu tarixiy arxiv ma’lumotlariga qo’shib yozilmagan.

Mazkur cheklovlar natijalarni oshirib ko’rsatmasdan ularning validatsiya darajasini belgilaydi. Tadqiqot doirasidagi asosiy savol — mahalliy sellulozali chiqindilardan kompozit stabilizator olish, C1–C4 ichidan eng muvozanatli formulatsiyani aniqlash va uni burg’ulashga yaqin sharoitda amaliy sinovgacha olib borish — mavjud dalillar bilan yakunlangan. Standart API/ISO mahsulot kvalifikatsiyasi esa alohida keyingi bosqichdir.

5. Texnologik masshtablash va amaliy ahamiyat

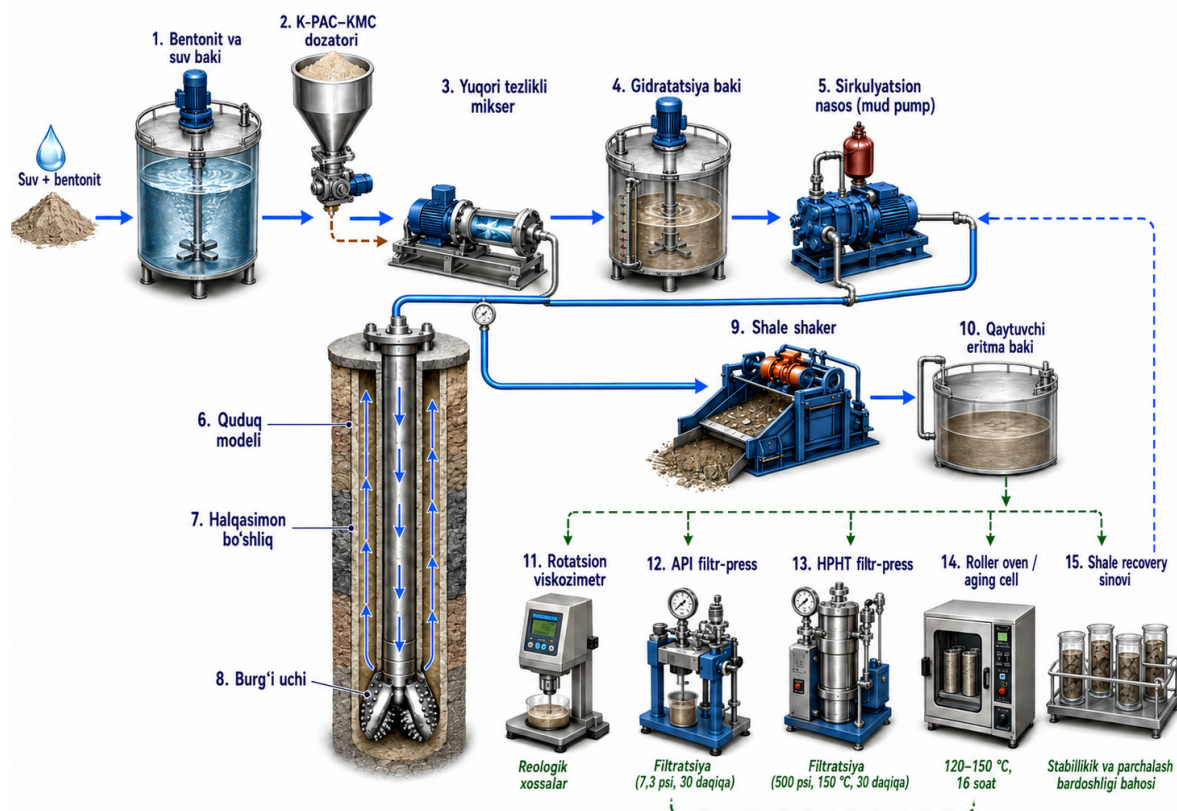
Dissertatsiya texnologik loyihasida K-PAC–KMC ishlab chiqarish liniyasi xomashyoni tayyorlash, ishqoriy pishirish, modifikatsiya/eterifikatsiya, neytrallash, filtrlash va quritish bosqichlariga ajratilgan. Reaksiya bloki uchun 60–75 °C va 2–3 soat, neytrallash uchun pH≈7 ishchi parametrlar keltirilgan. Loyiha hisoblarida energiya sarfini 650 dan 470 kWh/t gacha kamaytirish (taxminan 27,7%), texnologik siklni 12 dan 8 soatgacha qisqartirish va mahsulot tannarxini 18–20% pasaytirish imkoniyati baholangan. Mazkur qiymatlar iqtisodiy-texnologik loyiha baholari bo’lib, laboratoriya eksperimental natijalaridan alohida talqin qilinadi.

Mahalliy xomashyo asosidagi kompozitning asosiy amaliy afzalligi uch omilga borib taqaladi: (1) selluloza importiga nisbatan xomashyo zanjirining lokalizatsiyasi; (2) to’qimachilik va agrar chiqindilarini yuqori qo’shilgan qiymatli kimyoviy mahsulotga aylantirish; (3) burg’ulash eritmasida bitta komponent emas, bir nechta funksiyani — viskozlashtirish, filtratsiyani kamaytirish, qattiq fazani strukturaviy boshqarish va termik barqarorlikni — bitta kompozit orqali birlashtirish. 2024-yilgi Sho’rtan sinov hujjati ushbu texnologik konsepsiyaning ishlab chiqarish muhiti bilan aloqasi mavjudligini ko’rsatadi.

6. Xulosa

1. Sholi pahami va to’qimachilik tolali chiqindilardan ajratilgan selluloza K-PAC/KMC tipidagi modifikatsiyalangan selluloza hosilalarini olish uchun mahalliy xomashyo sifatida qo’llanishi eksperimental materiallar bilan ko’rsatildi.

2. To’qimachilik sellulozasi asosidagi K-PAC yuqori polimerlanish darajasi (1250) va dinamik qovushqoqlik (305,4 mPa·s), sholi sellulozasi asosidagi K-PAC esa yuqori



4-rasm. K-PAC–KMC qo'shimchali suv asosidagi burg'ulash eritmasini tayyorlash, sirkulyatsiya va nazorat qilishning texnologik sxemasi. Asosiy kontur: bentonit–suv bazasi → K-PAC–KMC dozatori → yuqori tezlikli mikser → gidratatsiya baki → sirkulyatsion nasos → quduq modeli → halqasimon bo'shliq → shale shaker → qaytuvchi eritma baki. Parallel nazorat: rotatsion viskozimetr, API filtr-press, HPHT filtr-press, roller oven/aging cell va shale-recovery sinovi.

6-jadval. Tadqiqotning laboratoriyadan amaliy validatsiyagacha bo'lgan dalillar zanjiri

Bosqich	O'lchangan/olingan dalil	Asosiy natija	Ilmiy status
1. Xomashyo	Sholi poholi va to'qimachilik tolali chiqindisi	Kimyoviy qayta ishlashga yaroqli sellyuloza olindi	Bajarilgan
2. Modifikatsiya	Alkalizatsiya + eterifikatsiya	K-PAC/KMC tipidagi suvda eruvchan sellyuloza efilari	Bajarilgan
3. Strukturaviy tasdiq	FTIR, TGA, XRD	Karboksil/eter guruhlar; 306–381 °C termik zonalar; 45–55% kristallik	Bajarilgan
4. Formulasitziya skriningi	C1–C4, 7 ta sifat ko'rsatkichi	C4: 3,2 cm ³ /min; DP 1050; eruvchanlik 98,8%	Bajarilgan
5. Matematik optimallashtirish	5 mezonli ISI	C4 = 1,000; C3 = 0,522; C2 = 0,289; C1 = 0,150	Ushbu maqolada yakunlangan
6. Termik/geologik sinov	120–150 °C, real geologik model	Funksional barqarorlik ijobiy baholangan	Bajarilgan
7. Amaliy validatsiya	Sho'rtan NGQB, 2024 ma'lumotnoma va dalolatnoma	Sinov-tajriba qo'llash, ijobiy natija, joriy etishga tavsiya	Bajarilgan

asosiy modda (88%) va eruvchanlik (99,2%) bilan ajralib, kompozitlash uchun komplementar xossalarni ta'minladi.

3. C1–C4 qatorida C4 5% namlik, 83% asosiy modda, 98,8% eruvchanlik, 3,2 cm³/min suv qaytarish va DP=1050 bilan eng muvozanatli formulasitziya bo'ldi; C1 ga nisbatan suv qaytarish 23,8% kamaydi va DP 56,7% oshdi.

4. Besh mezonli teng vaznli min–max integral samaradorlik indeksi C4=1,000, C3=0,522, C2=0,289 va C1=0,150 natijani berdi; bu C4 tanlovini o'lchangan sifat ko'rsatkichlari bo'yicha matematik ravishda mustahkamladi.

5. FTIR modifikatsiyalangan sellyulozada O–H, C–H, karbonil/karboksil, karboksilat va efir bog'lariga mos signallarni ko'rsatdi; dissertatsiya TGA/XRD ma'lumotlari esa termik va amorf-kristall tuzilish haqidagi qo'shimcha dalillarni berdi. Bu ma'lumotlar 120–150 °C termik-geologik baholash bilan birgalikda talqin qilindi.

6. 2024-yilgi Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi ma'lumotnomasi va dalolatnomasi dissertatsiya natijalarining sinov-tajriba asosida qo'llanganini va ijobiy deb topilib ishlab chiqarishga tatbiq etish tavsiya qilinganini tasdiqlaydi. 4-rasm ushbu amaliy bosqichni tayyorlash–sirkulyatsiya–qattiq fazani

ajratish–laboratoriya nazorati yagona texnologik konturida ifodalaydi.

7. C4 ni xalqaro bozorda burg'ulash reagenti sifatida tijoriylashtirish uchun keyingi bosqichda ISO 13500 va API RP 13I/13B-1 bo'yicha parallel kvalifikatsiya, jumladan API/HPHT filtratsiya, termik aging va shale-recovery testlarini to'liq xom ma'lumotlar bilan rasmiylashtirish tavsiya etiladi.

Muallif deklaratsiyalari

Manfaatlar to'qnashuvi: Muallif manfaatlar to'qnashuvi mavjud emasligini bildiradi.

Ma'lumotlar mavjudligi: C1–C4 formulatsiya va sifat ko'rsatkichlari dissertatsiyaning birlamchi eksperimental jadvallari hamda 2024-yilgi Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi ma'lumotnomasi va dalolatnomasi bilan qo'llab-quvvatlanadi. Maqoladagi nisbiy o'zgarishlar va ISI qiymatlari shu jadval qiymatlaridan qayta hisoblangan.

Etika: Tadqiqot tirik subyektlar yoki hayvonlar ustida tajribani o'z ichiga olmaydi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Khan M.A., Li M.-C., Lv K., Sun J., Liu C., Liu X., Shen H., Dai L., Lalji S.M. Cellulose derivatives as environmentally-friendly additives in water-based drilling fluids: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2024;342:122355. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122355
- [2] Noor A.A., Khan M.A., Zhang Y., Lv K., Sun J., Liu C., Li M.-C. Modified natural polymers as additives in high-temperature drilling fluids: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;287:138556. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.138556
- [3] Saadi R., Hamidi H., Wilkinson D. Optimizing filtration properties of water-based drilling fluids: Performance of PAC variants and synergistic effects. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025;715:136590. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136590
- [4] Guo D., Yuan T., Sun Q., Yan Z., Kong Z., Zhong L., Zhou Y., Sha L. Cellulose nanofibrils as rheology modifier and fluid loss additive in water-based drilling fluids: Rheological properties, rheological modeling, and filtration mechanisms. *Industrial Crops and Products*. 2023;193:116253. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116253
- [5] Jia X., Zhao X., Chen B., Egbu S.B., Huang Z. Polyanionic cellulose/hydrophilic monomer copolymer grafted silica nanocomposites as HTHP drilling fluid-loss control agent for water-based drilling fluids. *Applied Surface Science*. 2022;578:152089. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152089
- [6] Guo Y., Yang X., Wang R., Zhao M., Wang J., Xie J., Dai Z., Xu Q., Han Z., Jiang G., Cai J. Environmentally friendly and temperature resistant water-based drilling fluids with highly inhibitory synthetic nanocellulose polymers for deep sea drilling. *Geoenery Science and Engineering*. 2024;241:213196. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213196
- [7] Bai X., Xue Z., Wang M., Song M., Yang M., You J., Luo Y. Preparation and Application of Cellulose-Based Thermosensitive Polymer in Water-Based Drilling Fluid. *Polymers*. 2026;18(10):1187. DOI: 10.3390/polym18101187
- [8] Rahaman M.S., Nahar S.S., Islam J.M.M., et al. Utilization of Waste Textile Cotton by Synthesizing Sodium Carboxymethyl Cellulose: An Approach to Minimize Textile Solid Waste. *Advances in Polymer Technology*. 2022;2022:4255409. DOI: 10.1155/2022/4255409
- [9] Haleem N., Arshad M., Shahid M., Tahir M.A. Synthesis of carboxymethyl cellulose from waste of cotton ginning industry. *Carbohydrate Polymers*. 2014;113:249–255. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.07.023
- [10] Kafashi S., Rasaei M.R., Karimi G. Effects of sugarcane and polyanionic cellulose on rheological properties of drilling mud: An experimental approach. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2017;26(2):371–374. DOI: 10.1016/j.ejpe.2016.05.009
- [11] International Organization for Standardization. ISO 13500:2008. Petroleum and natural gas industries — Drilling fluid materials — Specifications and tests. 3rd ed., 2008; last reviewed and confirmed in 2021.
- [12] American Petroleum Institute. API RP 13I. Laboratory Testing of Drilling Fluids. 9th ed., December 2020; Addendum 1, January 2023.
- [13] American Petroleum Institute. API RP 13B-1. Field Testing Water-Based Drilling Fluids. 6th ed., January 2026.
- [14] Li M.-C., Tang Z., Liu C., Huang R., Koo M.S., Zhou G., Wu Q. Water-redispersible cellulose nanofiber and polyanionic cellulose hybrids for high-performance water-based drilling fluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020;59(32):14352–14363. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c02644
- [15] Villada Y., Iglesias M.C., Olivares M.L., Casis N., Zhu J., Peresin M.S., Estenoz D. Di-carboxylic acid cellulose nanofibril (DCA-CNF) as an additive in water-based drilling fluids applied to shale formations. *Cellulose*. 2021;28:417–436. DOI: 10.1007/s10570-020-03502-1