

Міністерство освіти і науки України
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра буріння та геології
Спеціальність 184 Гірництво

До захисту

Гарант освітньої програми
геології

Харченко М.О.

«19» _____ 2026 року

Завідувач кафедри буріння та

Винников Ю.Л.

«19» _____ 2026 року

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему Підвищення ефективності буріння нестійких гірських порід шляхом упровадження біополімерних бурових розчинів

Пояснювальна записка

Керівник

Ст. викладач Харченко І.Г.

посада, наук. ступінь, ПІБ

підпис, дата,

Виконавець роботи

Конотоп Руслан Юрійович

студент, ПІБ

група 601/ГБ

підпис, дата

Консультант за 1 розділом

к.т.н. доц. Миколенко О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

к.т.н., ст. викл. Рибанко М.О.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

к.т.н. доц. Майке О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 4 розділом

к.т.н. доц. Майке О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 10.01.2026 р.

Полтава, 2026

Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут: Нафти і газу
Кафедра: Буріння та геології
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр
Спеціальність: 185 Нафтогазова інженерія та технологій
Освітня програма: Буріння нафтових і газових свердловин

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології

Винников Ю.Л.

« 3 » 09 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Конотоп Руслан Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності буріння нестійких гірських порід шляхом упровадження біополімерних бурових розчинів

2. Керівник роботи ст.викл. кафедри буріння та геології Харченко І.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навч. закладу від « 3 » 09 2025 року № 1015-ф.с

3. Строк подання студентом роботи 20.01.2026р.

4. Вихідні дані до роботи

1. Нормативно-технічна література, періодичні видання, патенти на винаходи за темою роботи.

2. Проекти на влаштування свердловин (за необхідності).

3. Геологічні звіти за профілем роботи (за необхідності)

5. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Анотація

Вступ

1. Аналітичний огляд літературних джерел та сучасного стану досліджуваної проблеми

2. Обґрунтування об'єкта дослідження, вихідних даних та методів розв'язання поставлених задач.

3. Дослідження, розрахунки та експериментальне обґрунтування прийнятих технічних рішень.

Загальні висновки по роботі

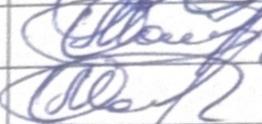
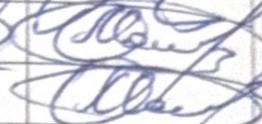
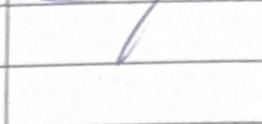
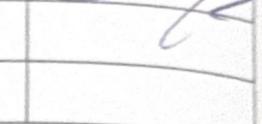
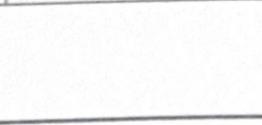
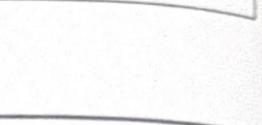
Список використаних джерел

Додатки (за необхідності)

6. Перелік графічного матеріалу

Презентація із основними результатами кваліфікаційної роботи

7. Консультанти розділів роботи

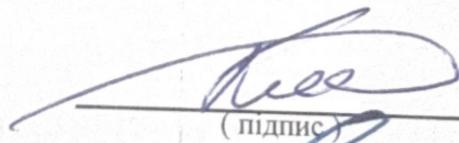
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н. доц. Миколайовська О.В.		
2	к.т.н. ст.вектор Рибарко		
3	к.т.н. доц. Матієш О.В.		
4	к.т.н. доц. Матієш О.В.		

8. Дата видачі завдання 3.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи підготовки	Термін виконання
1	Аналіз літературних джерел та сучасного стану проблеми	13.10.2025 - 02.11.2025
2	Формування мети, задач, обґрунтування об'єкта і предмета дослідження	03.11.2025 - 16.11.2025
3	Виконання основної частини роботи (розрахунки / експерименти / аналіз)	17.11.2025 - 28.12.2025
4	Узагальнення результатів, формування висновків	29.12.2025 - 05.01.2026
5	Оформлення та узгодження кваліфікаційної роботи	06.01.2026 - 12.01.2026
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи	13.01.2026 - 15.01.2026
7	Захист кваліфікаційної роботи	19.01.2026 - 23.01.2026

Студент


(підпис)

Коваленко Р.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Марченко І.Г.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПОЛІМЕРНИХ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ ДЛЯ БУРІННЯ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД. МЕТА ТА ЗАДАЧІ. <i>дослідження</i>	9
1.1. Передумови створення біополімерних бурових розчинів з тиксотропними властивостями	9
1.2. Аналіз біополімерних бурових розчинів на основі ксантанової камеді	14
1.3. Полімерні бурові розчини: властивості, досвід застосування та методи регулювання параметрів	20
1.4. Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження	30
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО СКЛАДУ БІОПОЛІМЕРНОГО БУРОВОГО РОЗЧИНУ ДЛЯ БУРІННЯ У НЕСТІЙКИХ ТЕРИГЕННИХ ВІДКЛАДАХ	32
2.1. Розробка біополімерної системи Біокар, її склад та основні властивості	32
2.2. Технологічні характеристики біополімерних систем у умовах високотемпературних нестійких теригенних покладів	35
2.3. Особливості застосування солей в біополімерних системах для покращення властивостей розчину	42
2.4. Висновки до розділу 2	50
РОЗДІЛ 3. УПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ БУРІННЯ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД В УМАВАХ КОПИЛІВСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА	52
3.1. Геолого-промислова характеристика родовища	52
3.2. Аналіз стану розробки родовища	65
3.3. Гірничо-геологічні умови буріння свердловин	81
3.4. Рекомендації щодо бурових розчинів	85
3.5. Висновки до розділу 3	88

РОЗДІЛ 4. УПРОВАДЖЕННЯ БІОПОЛІМЕРНИХ СИСТЕМ ПРИ БУРІННІ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА КОПИЛІВСЬКОМУ РОДОВИЩІ	89
4.1. Визначення впливу біополімерної системи на відновлення проникності кернів	89
4.2. Удосконалення біополімерної системи Біокар для розкриття нестійких зон у свердловинах з теригенними відкладами	93
4.3. Використання біополімерної системи Біокар при розкритті зон з аномальними умовами буріння	96
4.4. Використання біополімерної системи Біокар-МТ для розкриття продуктивних горизонтів Копилівського родовища	99
4.5. Висновки до розділу 4	103
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	107

АНОТАЦІЯ

Конотоп Р.Ю. Підвищення ефективності буріння нестійких гірських порід шляхом упровадження біополімерних бурових розчинів. Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 184 «Гірництво». – Полтава; Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2026.

Роботу присвячено оцінюванню впливу процесу буріння на колекторські параметри нестійкого теригенного пласта-колектора. Під час первинного або вторинного розкриття можливе забруднення привибійної зони, що супроводжується погіршенням природних фільтраційно-ємнісних характеристик і, як наслідок, здатне спричинити відчутне зниження продуктивності свердловини. Для зменшення таких втрат запропоновано до застосування біополімерні бурові розчини, які під час буріння забезпечують збереження проникності гірських порід та знижують ризик їх ушкодження.

У першому розділі виконано огляд сучасного стану використання полімерних промивальних систем із тиксотропними властивостями, що формуються на основі ксантанової камеді.

У другому розділі узагальнено результати лабораторних досліджень характеристик біополімерних бурових розчинів та подано рекомендації щодо коригування їх властивостей шляхом введення мінеральних солей.

У третьому розділі проведено аналіз Копилівського родовища з погляду доцільності впровадження технології буріння нових свердловин із використанням біополімерних систем.

У четвертому розділі наведено практичні рекомендації щодо первинного розкриття продуктивних горизонтів Копилівського газоконденсатного родовища із застосуванням біополімерних бурових розчинів.

Ключові слова: первинне розкриття, продуктивний пласт, бурові розчини, біополімери.

ABSTRACT

Konotop R. Yu. Improving the Efficiency of Drilling Unstable Rock Formations through the Implementation of Biopolymer Drilling Fluids. Master's qualification thesis in Specialty 184 "Mining". – Poltava; National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". – 2026.

The thesis is devoted to assessing the impact of the drilling process on the reservoir properties of an unstable terrigenous reservoir formation. During primary or secondary penetration, contamination of the near-wellbore zone may occur, accompanied by deterioration of the natural filtration–capacity characteristics and, consequently, capable of causing a significant decrease in well productivity. To reduce such losses, the use of biopolymer drilling fluids is proposed; these fluids help preserve rock permeability during drilling and reduce the risk of formation damage.

The first chapter reviews the current state of using polymer flushing systems with thixotropic properties formed on the basis of xanthan gum.

The second chapter summarizes the results of laboratory studies on the characteristics of biopolymer drilling fluids and provides recommendations for adjusting their properties by adding mineral salts.

The third chapter analyzes the Kopylivske field in terms of the feasibility of implementing the technology of drilling new wells using biopolymer systems.

The fourth chapter presents practical recommendations for primary penetration of productive horizons at the Kopylivske gas-condensate field using biopolymer drilling fluids.

Keywords: primary penetration, productive formation, drilling fluids, biopolymers.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПОЛІМЕРНИХ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ ДЛЯ БУРІННЯ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД. МЕТА ТА ЗАДАЧІ.

1.1. Передумови створення біополімерних бурових розчинів з тиксотропними властивостями

1.2. Аналіз біополімерних бурових розчинів на основі ксантанової камеді

1.3. Полімерні бурові розчини: властивості, досвід застосування та методи регулювання параметрів

1.4. Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО СКЛАДУ БІОПОЛІМЕРНОГО БУРОВОГО РОЗЧИНУ ДЛЯ БУРІННЯ У НЕСТІЙКИХ ТЕРИГЕННИХ ВІДКЛАДАХ

2.1. Розробка біополімерної системи Біокар, її склад та основні властивості

2.2. Технологічні характеристики біополімерних систем у умовах високотемпературних нестійких теригенних покладів

2.3. Особливості застосування солей в біополімерних системах для покращення властивостей розчину

2.4. Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. УПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ БУРІННЯ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД В УМАВАХ КОПИЛІВСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

3.1. Геолого-промислова характеристика родовища

3.2. Аналіз стану розробки родовища

3.3. Гірничо-геологічні умови буріння свердловин

3.4. Рекомендації щодо бурових розчинів

3.5. Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 4. УПРОВАДЖЕННЯ БІОПОЛІМЕРНИХ СИСТЕМ ПРИ БУРІННІ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА КОПИЛІВСЬКОМУ РОДОВИЩІ

4.1. Визначення впливу біополімерної системи на відновлення проникності кернів

4.2. Удосконалення біополімерної системи Біокар для розкриття нестійких зон у свердловинах з теригенними відкладами

4.3. Використання біополімерної системи Біокар при розкритті зон з аномальними умовами буріння

4.4. Використання біополімерної системи Біокар-МТ для розкриття продуктивних горизонтів Копилівського родовища

4.5. Висновки до розділу 4

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Актуальність роботи. Реалізацію потенціалу внутрішнього ринку вуглеводнів стримують кілька ключових чинників: значний ступінь виснаження родовищ (65–70 %), що зумовлює швидке зниження обсягів видобутку; складність доступу до ресурсів через велику глибину залягання (середня глибина покладів перевищує 3500 м); а також розпорошеність ресурсної бази внаслідок великої кількості малих родовищ — 89 % з них мають запаси не більше 5 млрд м³. Для сталого функціонування нафтогазового сектору річне нарощування сировинної бази повинно у 2–3 рази перевищувати поточний рівень видобутку.

Суттєвий внесок у збільшення темпів буріння та видобутку вуглеводнів забезпечують бурові розчини. Забруднення привибійної зони пласта під час первинного або повторного розкриття та пов'язане з цим погіршення природних колекторських властивостей здатні спричинити істотне падіння продуктивності свердловин. Водночас зниження рівня такого забруднення може відкрити можливість промислового отримання продукції з покладів, видобуток з яких ще донедавна був технічно або економічно недоцільним.

Отже, подальші перспективи використання біополімерних безглинистих систем у технологіях буріння глибоких свердловин в Україні безпосередньо пов'язані з потребою дослідити їх реологічні та фільтраційні характеристики за високих тисків і температур. Це також вимагає створення та практичної перевірки підходів до цілеспрямованого регулювання їх параметрів.

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є підвищення результативності застосування біополімерних бурових розчинів під час буріння нестійких теригенних відкладів.

Задачі досліджень:

1. Виконати аналіз рецептури біополімерного бурового розчину Біокар.

2. Дослідити технологічні властивості безглинистого біополімерного розчину Біокар у теригенних відкладах.
3. Провести аналіз Копилівського родовища щодо можливості впровадження технології буріння із використанням біополімерного безглинистого розчину Біокар.
4. Реалізувати застосування рецептури Біокар під час розкриття продуктивних горизонтів Копилівського ГКР.

Об'єктом дослідження є процеси буріння глибоких свердловин у нестійких теригенних гірських породах.

Предмет дослідження – удосконалення технологічних характеристик біополімерних систем бурових розчинів при первинному розкритті теригенних відкладів.

Методи дослідження. Оцінювання технологічних параметрів бурових розчинів здійснювали за стандартними методиками контролю. Реологічні властивості з урахуванням температурного чинника визначали у лабораторних умовах.

Наукова новизна – отримано нові дослідні дані стосовно фільтраційних властивостей біополімерних безглинистих систем у процесі буріння теригенних відкладів встановлено синергетичний ефект інгібування хлориду калію при його поєднанні з хлоридом натрію. Також показано, що інгібуючий вплив полівалентних солей за концентрацій понад 25–30 % перевищує ефективність використання хлориду калію.

Практичне значення одержаних результатів полягає у вдосконаленні технології первинного розкриття теригенних відкладів башкирського ярусу середнього карбону на Копилівському родовищі із застосуванням системи Біокар.

Апробація результатів досліджень. Ключові положення магістерської роботи були представлені та отримали схвалення на 77 науково-практичній конференції викладачів, аспірантів і студентів Національного університету Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, чотири розділи, висновки та перелік використаних джерел. Загальний обсяг основного тексту становить 102 сторінки; у роботі наведено 17 рисунків і 22 таблиці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПОЛІМЕРНИХ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ ДЛЯ БУРІННЯ НЕСТІЙКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

1.1 Передумови створення біополімерних бурових розчинів з тиксотропними властивостями

Першою промивальною рідиною, що використовувалася при бурінні свердловин, була звичайна вода. В процесі проходження глинистих порід вода насичувалася дрібнодисперсними глинистими частинками, утворюючи глинисту суспензію. Така суспензія характеризувалася особливими тиксотропними структурно-механічними властивостями, завдяки яким вона могла утримувати вибурені уламки породи та обважнювач у завислому стані під час зупинок циркуляції. Це запобігало осіданню шламу та прихватам бурильного інструменту, а також давало можливість регулювати густину і в'язкість промивальної рідини.

Втім, надмірне накопичення твердої фази (передусім глини) у промивальній рідині призводило до низки проблем – від поглинання бурового розчину породою до його різкого загущення до неплинного стану, особливо при контакті з мінералізованими пластовими водами або введенні солей. Для розв'язання цієї проблеми почали додавати спеціальні хімічні реагенти як регулятори технологічних властивостей бурових розчинів, що ознаменувало перехід від нестабілізованих глинистих суспензій до стабілізованих – складних багатокомпонентних дисперсних систем. Введення органічних хімічних добавок значно підвищило стійкість бурових розчинів до зовнішніх чинників і поліпшило їх експлуатаційні характеристики. Утворені органо-мінеральні комплекси між глинистими частинками та реагентами надали промивальним рідинам нові властивості, зокрема керовану структуру та підвищену стабільність. Використання реагентів також дозволило контролювати агрегативну та седиментаційну стійкість глинистих суспензій,

їх структурно-механічні та реологічні параметри, а також стійкість до дії електролітів і температур.

Зростання стійкості глинистих суспензій створило передумови для цілеспрямованого підвищення мінералізації бурових розчинів – введення в їх склад значних концентрацій мінеральних солей. Так було започатковано клас інгібованих бурових розчинів (хімічно стабілізованих щодо глин): спочатку вапняних та хлоридно-натрієвих, згодом висококальцієвих, а з часом хлоридно-калієвих. Поява інгібованих розчинів відкрила новий етап розвитку фізико-хімії бурових розчинів, орієнтований на контроль стійкості гірських порід і поліпшення якості розкриття продуктивних пластів. З часом традиційні стабілізатори на основі гуматів і лігносульфонатів, що мали небажану диспергуючу дію на глинисті породи, були замінені високомолекулярними полімерними реагентами – акриловими, целюлозними, крохмальними тощо. У такий спосіб сформувався новий клас бурових розчинів – полімер-інгібовані системи, які відзначалися значно сильнішим інгібуючим впливом на глинисті породи та набули низку позитивних властивостей завдяки ланцюговій будові високомолекулярних полімерів з великою кількістю активних центрів на їх поверхні. Спільне використання високомолекулярних полімерів і неорганічних солей виявилось оптимальним для створення ефективних інгібованих бурових розчинів[1]. Такі системи за своїм впливом на породи стали реальною екологічно безпечною альтернативою нафтоемульсійним розчинам, і нині саме полімер-інгібовані розчини є одними з найпоширеніших у світі для буріння складних свердловин.

Застосування високомолекулярних полімерів у бурових розчинах дозволило досягти необхідних реологічних параметрів при значно меншому вмісті глинистої фази. Це стимулювало розвиток напряму зі створення малоглинистих та безглинистих бурових розчинів. Дослідження, спрямовані на підвищення швидкості та здешевлення буріння, показали, що гранично допустимий вміст твердої фази у промивальній рідині не повинен перевищувати ~6%. Важливим фактором на користь

малоглинистих/безглинистих систем став також негативний вплив твердої (особливо глинистої) фази на колекторські властивості пластів. Частинки твердого матеріалу, проникаючи в проникний пласт, утворюють внутрішню кірку кольматажу, що незворотно погіршує фільтраційні характеристики колектора. Тому бурові розчини без твердої фази або з її мінімальним вмістом виявилися ефективнішими щодо збереження проникності продуктивних пластів.

Практичне впровадження малоглинистих і безглинистих розчинів показало їх позитивний вплив на технологію буріння: покращувалися техніко-економічні показники, знижувався ризик ускладнень, підвищувалася якість розкриття продуктивних пластів, особливо в умовах неглибоких свердловин із низькими пластовими тисками. Водночас застосування розчинів без твердої фази або надто розбавлених водою було обмеженим переважно верхніми інтервалами розрізу. Це зумовлено відсутністю в таких системах ефективних засобів очищення та контролю твердих часток: у процесі буріння вміст вибуреного шламу неухильно зростає, що вимагало постійного розбавлення і призводило до різкого збільшення об'єму розчину. Надлишковий об'єм доводилося скидувати в шламосховища, що підвищувало витрати реагентів і загрожувало екології. Попри регулярні обробки реагентами та розбавлення, безглинисті розчини все одно накопичували тверду фазу, ускладнюючи дотримання міжнародних стандартів (не більше 6% твердої фази).

Ситуація докорінно поліпшилася з появою високоефективних багатоступневих систем очищення, зокрема сучасних центрифуг із регульованою швидкістю обертання ротора, здатних видаляти до 90–95% вибурених шламу. На сьогодні технологія використання полімер-глинистих бурових розчинів (тобто низькосолідних систем з полімерними реагентами) є добре відпрацьованою і широко застосовується на практиці. В таких розчинах невелика кількість глини виконує роль тонкодисперсної твердої фази, а необхідні реологічні властивості досягаються завдяки взаємодії полімерів із активними центрами на поверхні глинистих частинок.

На відміну від полімер-глинистих розчинів, безглинисті системи ґрунтуються на взаємодії між молекулами полімерів або між полімерами та неглинистими твердими наповнювачами, які виконують роль інертної твердої фази. Оскільки безглинисті розчини зазвичай застосовуються при розкритті продуктивних горизонтів, вимоги до них висуваються більш жорсткі – зокрема, щодо термостійкості, можливості обважнення, реологічних та фільтраційних властивостей в умовах вибою свердловини [2][3]. Найпоширенішими стали безглинисті системи на основі високомінералізованих розчинів солей, загущених полімерними реагентами. Густину таких промивальних рідин регулюють типом і концентрацією солі: наприклад, для водних розчинів NaCl можна досягти густини ~ 1180 кг/м³, для бішофіту (MgCl₂) ~ 1270 кг/м³, CaCl₂ – ~ 1320 кг/м³. Для отримання ще важчих систем застосовують дорогі насичені розсоли ZnCl₂, ZnBr₂, CaBr₂ та їх суміші. Загущення таких розсолів забезпечують водорозчинні полімери – похідні целюлози (РАС, ГЕЦ тощо), натуральні полісахариди та синтетичні полімери (наприклад, полівініловий спирт, поліоксиетилен, поліакриламід та ін.). Отримані полімерно-сольові системи мають певні реологічні характеристики, достатні для очищення вибою і транспорту вибуреної породи на поверхню. Проте у них є суттєві недоліки: відсутність тиксотропної (структурованої) структури та підвищена фільтрація за високих тисків і температур. Через це такі системи найчастіше застосовуються не при бурінні відкритого стовбура, а під час спеціальних робіт – наприклад, як промивальні рідини в обсадних колонах при освоєнні та ремонті свердловин або як тампонажні розчини-роздільники.

Основною причиною високої вибійної фільтрації загущених сольових систем є відсутність тонкодисперсної твердої фази, здатної утворювати низькопроникну фільтраційну кірку. За відсутності такого бар'єру навіть дуже в'язка рідина під дією диференційного тиску інтенсивно проникатиме в породи колектора. Підвищення в'язкості за рахунок полімера може дещо зменшити проникнення, але в умовах вибою, де температура висока і

реологічні властивості полімерів погіршуються, фільтрація різко зростає. Додавання до розчину твердих частинок відповідного розміру могло б зменшити фільтрацію, проте для утримання цих частинок у завислому стані рідина повинна мати тиксотропні властивості (утворювати просторову структуру при відсутності течії).

Це стимулювало дослідження зі створення тиксотропних безглинистих бурових розчинів, які особливо інтенсивно розвивалися у другій половині ХХ століття. На ранніх етапах, коли біополімерні реагенти ще не застосовувалися, пропонувалися різні підходи до структурування рідини. Умовно їх можна об'єднати в кілька груп (алгоритмів формування структури):

- **Гідрогелева структура** – введення до розчину конденсованої твердої фази, яка утворює просторовий каркас (гідрогель) за рахунок зчеплення частинок між собою.

- **Структура об'ємного заповнення** – формування каркасу частинками інертного неглинистого наповнювача, що рівномірно заповнюють весь об'єм рідини та при достатній концентрації створюють контактний “скелет” у стані спокою.

- **Полімерна (зв'язана) структура** – зв'язування ланцюгів розчинного полімеру між собою за допомогою спеціальних речовин-комплексоутворювачів (шляхом іонних або координаційних зв'язків), що приводить до утворення тривимірної сітки з полімерних молекул.

Серед перелічених підходів найбільшого поширення набула технологія створення тиксотропних безглинистих розчинів на основі продуктів конденсації малорозчинних сполук у мінералізованому середовищі. Таке середовище отримують шляхом змішування двох або більше розчинів електролітів, які при контакті вступають у реакцію обмінного розкладу з утворенням дрібнокристалічного осаду. Частинки, отримані таким чином, відзначаються високою дисперсністю та стійкістю до коагуляції в сольовому розчині, і за певних умов здатні утворювати просторову структурну сітку (міжчастинкові контакти). Метод структурування рідини конденсованою

твердою фазою знайшов застосування у створенні так званих гідрогелевих та “солегелевих” бурових розчинів. Проте він має й недоліки: складність контролю і регулювання процесу осадження, старіння та поступове укрупнення (кристалізація) гелевих структур під час буріння, що може призводити до часткової або повної втрати тиксотропних властивостей розчину. Ці проблеми спонукали науковців шукати нові рішення – і ключ до створення стійких тиксотропних систем було знайдено з появою біополімерних реагентів.

1.2 Аналіз біополімерних бурових розчинів на основі ксантанової камеді

Розв’язати проблему отримання тиксотропних безглинистих бурових розчинів вдалося завдяки розробці біополімерних реагентів, передусім ксантанової камеді. Саме ксантанова камедь (також відома як ксантан) стала ключовим структуроутворюючим компонентом сучасних безглинистих систем промивання свердловин. Це модифікований природний гетерополісахарид, що утворюється мікроорганізмами *Xanthomonas campestris* у процесі ферментації цукрів. У природних умовах бактерії *X. campestris* продукують ксантан на поверхні рослин родини хрестоцвітих (капустяних) під час свого життєвого циклу. Промислове виробництво ксантанової камеді здійснюється методом глибинного аеробного бродіння суслу, що містить вуглеводи (наприклад, цукор), джерела азоту, мікроелементи та інші поживні компоненти. Процес включає багатостадійну підготовку посівного матеріалу, ферментацію у великих стерильних реакторах з контрольованими умовами (аерація, перемішування, рН, температура), пастеризацію бульйону для знищення бактерій-збудників та виділення ксантану осадженням спиртом. Отриманий осад ксантану відмивають від домішок, сушать, подрібнюють і упаковують у вигляді порошку [4][5]. Типова молекулярна маса технічного ксантану становить близько 2 млн Да (що відповідає приблизно 2000 мономерних ланок у молекулі) за даними виробника (CP Kelco). Інші джерела

наводять значення порядку $5 \cdot 10^6$ Да і навіть до $5 \cdot 10^7$ Да; настільки великий розкид пояснюють схильністю молекул ксантану до агрегації.

Структурною одиницею молекули ксантану є повторюваний пентасхаридний фрагмент, що складається з залишків β -D-глюкози, α -D-манози та α -D-глюкуронової кислоти у співвідношенні 2:2:1. Ланцюг β -D-глюкози утворює основну «хребтову» полімерну ланку, у якій глюкозні залишки з'єднані 1,4-глікозидними зв'язками. Кожен другий залишок глюкози несе короткий бічний ланцюг із трьох моносахаридів (маноза–глюкуронова кислота–маноза). Кінцевий залишок манози може містити піруватну групу, а маноза, що прилягає до основного ланцюга, часто ацетильована по 6-ому атому вуглецю. Схематичну структурну формулу цього біополімеру наведено на рис. 1.1.

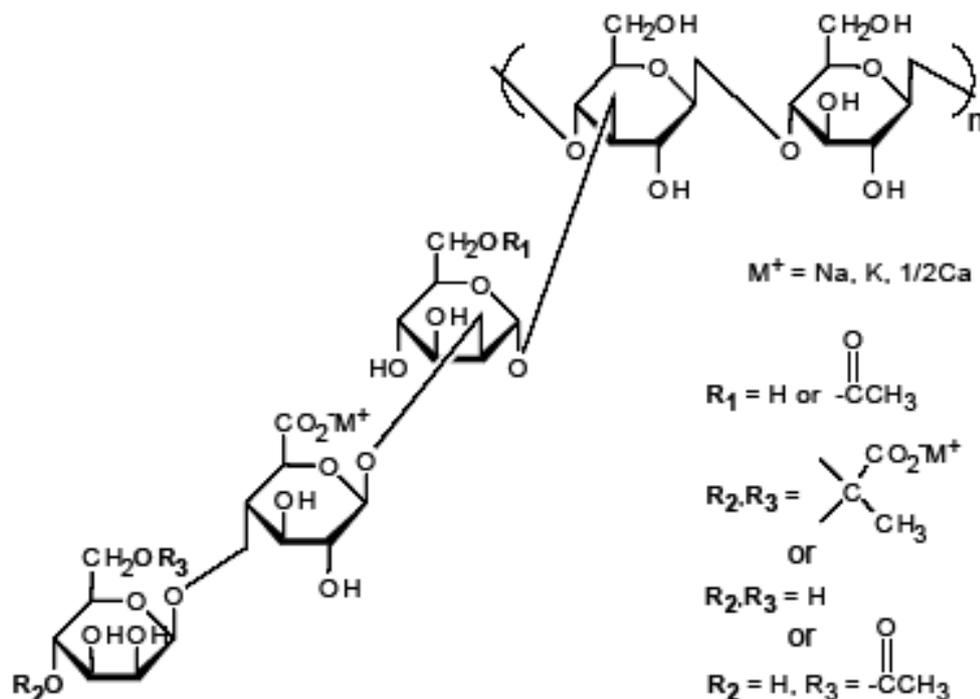


Рисунок 1.1 – Структура ксантанової камеді

Хімічна будова ксантанової камеді зумовлює її розчинність у воді та реологічні характеристики утворених розчинів. Наявність великої кількості

карбоксильних (глюкуронових) і піруватних кислотних груп на бокових ланцюгах надає молекулам ксантану високий негативний заряд. Регулярно розташовані аніонні бокові фрагменти спричиняють електростатичне відштовхування молекул одна від одної, збільшення ступеня їхньої гідратації та розкручування спіралеподібних макромолекул. Як наслідок, при малих градієнтах швидкості зсуву (в режимі спокою або повільної течії) спостерігається зменшення ефективної в'язкості розчину. З іншого боку, ксантан у водних розчинах виявляє здатність до самоасоціації: при підвищенні концентрації полісахариду чи іонної сили розчину окремі ланцюги з'єднуються між собою і формують гелеву структуру. Такий гель являє собою тривимірну сітку із подвійних спіралей ксантану, зшитих міжмолекулярними водневими зв'язками. Утворення гелю суттєво підвищує в'язкість розчину при низьких швидкостях зсуву.

Отже, у водному розчині ксантанової камеді одночасно проявляються дві протилежні тенденції. Перша – до агрегації молекул і утворення гелю, що підвищує в'язкість, а друга – до взаємного відштовхування молекул і деполімеризації структур, що знижує в'язкість. Залежно від зовнішніх умов (концентрації полімеру, наявності солей, градієнту швидкості течії, температури тощо) може переважати одна або інша тенденція, що пояснює виражену псевдопластичність (неньютонівську поведінку) ксантанових розчинів. При малих швидкостях зсуву домінують процеси утворення гелю – зв'язана структура забезпечує високу в'язкість і здатність утримувати тверді частинки у зависі. Натомість зі зростанням швидкості зсуву гелева сітка руйнується, окремі макромолекули орієнтуються в напрямку потоку, і ефективна в'язкість різко зменшується. Важливо, що після припинення механічного впливу молекулярні агрегати ксантану майже миттєво відновлюються, відтворюючи структуру гелю.

Унікальна здатність ксантанової камеді до різкого зсувного розрідження та швидкого відновлення структури є надзвичайно цінною для промивальних рідин при бурінні. За високих градієнтів зсуву (всередині бурильних труб) її

розчин проявляє дуже низьку в'язкість – наближену до в'язкості води. Натомість у затрубному просторі (де швидкості течії нижчі) реологічні властивості рідини аномально високі [6]. Завдяки цьому ксантанові розчини перевершують системи на інших полімерних загусниках за ефективністю очищення вибою свердловини від шламу та забезпечують порівняно низькі гідравлічні втрати (низький еквівалент щільності циркуляції, ECD) [7]. Введення до практики буріння таких вискоефективних псевдопластичних реагентів стало одним із важливих кроків розвитку водних бурових розчинів.

Зазвичай підвищення температури призводить до зниження в'язкості полімерних розчинів, і ксантанові системи не є винятком. Проте ступінь термічного розрідження ксантану істотно залежить від мінералізації середовища. У прісній воді в'язкість ксантанової камеді може різко падати вже в інтервалі $\sim 70\text{--}120\text{ }^\circ\text{C}$ [8], тоді як у вискомінералізованих розчинах упорядкована структура полімеру зберігається до вищих температур. Додавання солей екранує заряджені групи ксантану, зменшуючи електростатичне відштовхування між ланцюгами, і тим самим послаблює ефект розрідження при нагріванні. Одночасно зростає роль протилежної тенденції – міжмолекулярної асоціації (гелювання), що ущільнює структуру розчину [9]. Інакше кажучи, у високосольовому середовищі ксантановий розчин набуває своєрідного “резерву” в'язкості, який протидіє термічному зниженню густини гелю. Практично це означає можливість регулювання термостійкості ксантанових біополімерів через зміну мінералізації водної фази розчину [10]. Зазначені ефекти чітко проявляються при достатньо високій концентрації ксантану – порядку ≥ 2000 мг/л ($\approx 0,2\%$ мас.). За менших дозувань солі майже не впливають на в'язкість або навіть можуть спричиняти незначне зниження в'язкості [11].

У цілому розчини ксантанової камеді відзначаються високою стійкістю до агресивних чинників – одновалентних і багатовалентних солей, кислот, лугів, підвищеної температури. За цими показниками вони часто перевершують інші природні полімери завдяки впорядкованій структурі

макромолекул та екрануванню основного ланцюга розгалуженими боковими фрагментами. Відомо, втім, що при екстремально високому рН (≈ 12 і вище) молекули ксантану зазнають лужного гідролізу, втрачаючи свою структуру, – внаслідок чого в'язкість розчину стрімко падає і система руйнується. Це обмежує застосування ксантанових розчинів при розбурюванні великих цементних мостів, коли відбувається значне защелачування рідини. Проте згадане обмеження легко долається введенням спеціальних реагентів (наприклад, буферних добавок чи бактерицидів для запобігання біодеструкції), що дозволяє успішно використовувати ксантан навіть у складних умовах [12].

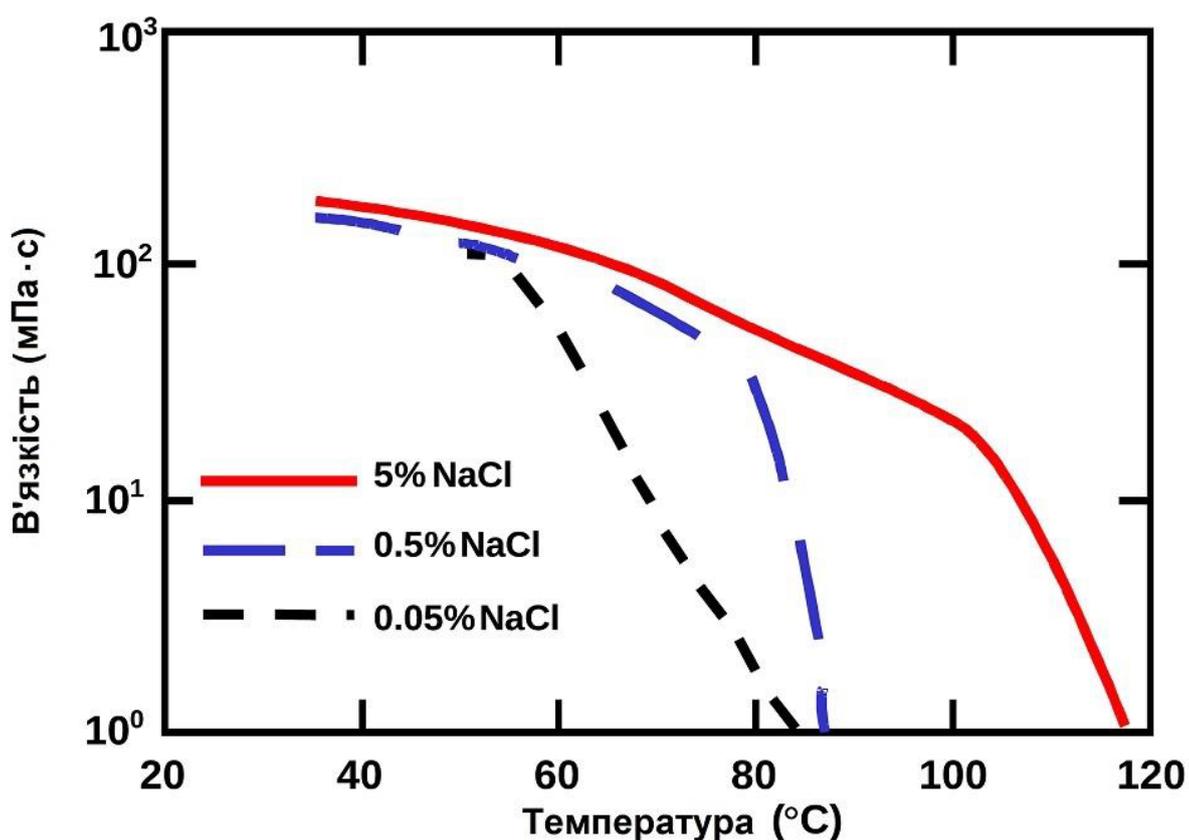


Рисунок 1.2 – Залежність в'язкості від температури

Варто зазначити, що ксантанова камедь є відносно стійкою до мікробіологічної деструкції у порівнянні з іншими полісахаридними

реагентами, проте при дуже тривалому перебуванні розчину у застійному стані все ж спостерігається поступове зниження його в'язкості через ферментативне розщеплення полімеру. Зазвичай цю проблему вирішують додаванням консервантів-бактерицидів.

Завдяки сукупності унікальних властивостей ксантанова камедь сьогодні є незамінним компонентом бурових і тампонажних розчинів. Вона ефективно підвищує в'язкість і знижує фільтрацію навіть у малих концентраціях, мінімізує кольматацію продуктивних пластів, а також сумісна з більшістю інших компонентів промивальних систем [13]. Сучасні промислові продукти на основі ксантану (Kelzan, Xanvis, Flowzan, Barazan, Роль, ХС-polymer та інші) мають численні модифікації, що відрізняються ступенем очищення, диспергованістю, швидкістю гідратації тощо. Однак сам по собі цей біополімер не задовольняє всіх вимог до промивальної рідини – наприклад, чистий ксантановий розчин не утворює міцної фільтраційної кірки (показник фільтрації залишається зависоко) і не проявляє тиксотропних властивостей без додаткових структуроутворювачів. Для усунення цих недоліків ксантан зазвичай поєднують з іншими реагентами або модифікують. Відзначимо також, що поряд з ксантановою камеддю в бурінні знаходять застосування й інші природні біополімери схожого типу, зокрема веланова та діутанова камедь (продукти життєдіяльності бактерій *Sphingomonas*). Веланова камедь за структурою близька до ксантану, але має вищу термічну стабільність та толерантність до солей. Згідно з технічними даними, вона зберігає в'язкість при температурах до 150 °С і стійка в середовищах із високим вмістом кальцію та луку [14]. Такий біополімер рекомендується для умов, коли температура або концентрація Ca_2 перевищує межі застосування звичайного ксантану [15]. Діутанова камедь (діутан) є іншим перспективним мікробіологічним полісахаридом, що вирізняється підвищеною стійкістю до високих температур і солоності. Дослідження показали, що бурові розчини на основі діутану в ряді випадків перевершують ксантанові за реологічними показниками, хоча обидві системи знижують в'язкість при нагріванні [16]. В цілому, традиційні

біополімери (включаючи ксантан, велан, діутан тощо) надійно працюють у діапазоні температур до $\sim 120\text{--}130\text{ }^{\circ}\text{C}$. При вищих температурах їхня молекулярна структура поступово руйнується, що призводить до втрати реологічних властивостей розчину [17]. Згідно з літературними даними, біополімерні бурові розчини практично не застосовуються при температурах понад $\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18] – у таких умовах доводиться переходити на синтетичні полімерні системи або спеціально модифіковані реагенти. Останні досягнення в цій галузі, зокрема щодо підвищення термо- і солестійкості біополімерів, а також їх роботи при високих температурах і тисках, розглядаються у наступному підрозділі.

1.3 Полімерні бурові розчини: властивості, досвід застосування та методи регулювання параметрів

Як зазначалося, ксантанова камедь та споріднені біополімерні реагенти значно покращують властивості бурового розчину, проте самі по собі не забезпечують увесь комплекс необхідних параметрів. Зокрема, ксантан недостатньо ефективний як понижувач фільтрації (не утворює щільної глинистої кірки) і у водних розчинах не проявляє тиксотропії (після припинення руху не здатний утримувати тверді частки без додаткових структуротворчих домішок). Тому сучасні безглинисті промивальні системи будуються на поєднанні кількох компонентів. У більшості рецептур присутній біополімер ксантан для надання псевдопластичних (шар-змивальних) властивостей, а для формування структури та зниження фільтрації додають етерифікований крохмаль або целюлозу (наприклад, карбоксиметилцелюлозу або поліаніліну целюлозу – РАС). Взаємодія між молекулами ксантану та такими модифікованими полісахаридами забезпечує утворення тиксотропного структурного каркасу, який характеризується низьким показником фільтрації та необхідними реологічними параметрами [19]. Саме завдяки введенню біополімерів сучасні безглинисті системи принципово відрізняються від

перших аналогів, що розроблялися наприкінці ХХ ст. і не містили високомолекулярних органічних загусників.

Синергетична взаємодія між ксантановою камеддю та полісахаридними стабілізаторами полягає в тому, що вони взаємно доповнюють дію одне одного у створенні структурної сітки. Ксантан, гідратуючи, формує первинний каркас із водневих зв'язків, визначаючи базову структуру розчину. Додаваний крохмаль або целюлоза (особливо в модифікованій формі) також сильно гідратує і частково вбудовується в цю сітку, перерозподіляючи вузли зв'язків та вирівнюючи міцність структури [20]. У результаті суміш двох полісахаридів утворює більш рівномірний просторовий каркас, ніж кожен компонент окремо, що і надає системі тиксотропних властивостей. Існують рецептури, де ксантан поєднується і з іншими реагентами (наприклад, з гуматами, лігносульфонатами, акриловими полімерними добавками). Однак у таких системах утворення структури відбувається за іншими механізмами – більше схожими на формування об'ємних гідрогелевих комплексів, ніж на класичну тиксотропію. Подібні рецептури є окремим напрямом і в даному огляді не розглядаються докладно [21].

Практичний досвід застосування полімерних безглинистих розчинів підтверджує ефективність комбінації біополімеру з полісахаридним стабілізатором. Такі системи забезпечують низьку поверхневу та вибійну фільтрацію, проявляють тиксотропні властивості та вигідну реологію – для них характерний високий динамічний напруження зсуву (тепловий вихід гелю) при відносно невеликій пластичній в'язкості [22]. Завдяки відсутності глини щільність полімерного розчину може бути знижена до $\sim 1100 \text{ кг/м}^3$ і нижче, не втрачаючи при цьому здатності транспортувати шлам і утримувати тверді частки у зависі. Це дуже актуально при бурінні глибоких свердловин, коли потрібно зменшити гідростатичний тиск на пласт (щоб уникнути розриву слабких формацій або диференційних прихватів) та знизити навантаження на обладнання. Зменшення густини розчину при збереженні його реологічних і структурно-механічних властивостей є корисним також у зонах аномально

низьких пластових тисків, де важкі глинисті суспензії непридатні. Полегшені полімерні системи сприяють кращому розкриттю продуктивних пластів та підвищують механічну швидкість проходки, підвищуючи загальну економічну ефективність буріння.

Реологічні характеристики біополімерних бурових розчинів, обумовлені їх псевдопластичною поведінкою, найчастіше описуються степеневою моделлю Оствальда-де Ваале (так званою “закономірністю силового закону”). Важливо враховувати, що реальні бурові розчини можуть мати певне динамічне напруження зсуву (межу текучості), тому використання спрощених двопараметричних моделей (як-от ідеалізована псевдопластична модель без врахування межі текучості) може призводити до похибок у розрахунках гідравліки колон. Практика показує, що поведінка полімерних систем у широкому діапазоні швидкостей зсуву ліпше узгоджується з трипараметричною моделлю Гершеля–Балклі. Ця модель поєднує властивості пластичної та псевдопластичної рідини і вводить параметр τ_0 (межу текучості), тому дозволяє коректно описати реологічну криву як у області високих градієнтів (де рідина поводить себе як розріджена), так і при низьких швидкостях (де проявляється структурна міцність). В умовах, коли важливо відтворити поведінку розчину в усьому діапазоні режимів течії, модель Гершеля–Балклі зазвичай дає найкраще наближення до експериментальних даних [23]. Водночас у польових умовах на підприємствах бурової галузі все ще широко застосовується класична модель в'язкопластичної рідини Бінгама (Шведова–Бінгама) – головним чином через її простоту і усталеність методик розрахунку. Бінгамівська модель достатньо точно описує поведінку бурового розчину у середньому діапазоні градієнтів, тому продовжує використовуватися для інженерних розрахунків реології безглинистих розчинів (незважаючи на дещо гіршу відповідність експериментальним даним порівняно з моделлю Гершеля–Балклі).

При використанні біополімерних промивальних систем одним із найважливіших завдань є контроль їх реологічних властивостей. Інженерно-

технологічна служба здійснює регулярні вимірювання в'язкісних параметрів на ротаційних віскозиметрах (типу Fann) при кількох швидкостях обертання. Отримані показники дають змогу оцінити стан розчину: зміни пластичної в'язкості, динамічної та статичної густини зсуву тощо можуть сигналізувати про вплив зовнішніх факторів (підвищення температури, бактеріальна активність, механічна деградація полімеру в насосах або підвищення лужності середовища) [20][24]. Високий вміст полімерів у безглинистих розчинах забезпечує їм низький показник фільтрації. Характерно, що навіть після повного руйнування структури (наприклад, під дією високих температур або інтенсивного перемішування) фільтрація таких систем залишається низькою. Іншими словами, величина втрати фільтрату майже не змінюється при розпаді структурного каркасу, що робить цей показник менш критичним у практичному відношенні [25].

Традиційний параметр умовної в'язкості (час витікання через лійку Марша або вимір приладом ВП-5), який іноді використовується для оперативної оцінки властивостей розчину, насправді має обмежену інформативність для полімерних систем. Цей інтегральний показник формується при відносно низьких градієнтах зсуву і залежить від багатьох чинників: реологічної кривої рідини, співвідношення межі текучості до пластичної в'язкості, вмісту твердої фази та її дисперсності, частки колоїдного компоненту тощо. Тому значення умовної в'язкості полімерного розчину важко передбачити теоретично, воно потребує вимірювання і може змінюватися в процесі буріння внаслідок комплексного впливу різних факторів.

Регулювання технологічних властивостей біополімерних бурових розчинів здійснюється насамперед за рахунок зміни концентрації їх компонентів – зокрема, біополімеру і сополімеру-стабілізатора. Збільшення дози ксантанової камеді підсилює псевдопластичні властивості системи (підвищує відносну різницю в'язкості між малими та високими швидкостями зсуву) і, як правило, знижує фільтрацію, адже більша кількість полімеру

ефективніше ущільнює структуру розчину [26]. Підвищення вмісту крохмалю або іншого полімерного стабілізатора також приводить до зменшення водовіддачі, а завдяки синергії з біополімером може дещо підвищити і реологічні параметри (зокрема, показники структурної міцності) [27]. Важливо підбирати оптимальне співвідношення між біополімером і стабілізатором – за надлишку крохмалю система може надмірно загущуватися і втрачати рухливість, тоді як нестача стабілізатора не забезпечить необхідного зниження фільтрації. Останнім часом для спрощення контролю параметрів знайшли застосування спеціальні комплексні реагенти-компаунди, що містять у стандартизованих пропорціях всі основні компоненти безглинистого розчину (ксантан, крохмаль, ПАЦ, інгібітори тощо). Додавання такого компаунду в потрібній концентрації дозволяє швидко скоригувати властивості розчину до необхідних значень без дозування кожного компоненту окремо [28].

Складні термобаричні умови глибоких та гарячих свердловин висувають особливі вимоги до полімерних систем. За високих температур в'язкість біополімерного розчину істотно падає [17], тому виникає потреба у створенні певного “запасу в'язкості” при приготуванні розчину на поверхні, щоби компенсувати розрідження на вибої. На практиці це означає, що початкові реологічні параметри задають дещо завищеними (наприклад, збільшують концентрацію ксантану або вводять структуроутворювач) очікуючи, що на великій глибині і температурі вони знизяться до робочого рівня. Обсяг цього запасу визначають емпірично для кожного конкретного випадку – через брак повної інформації про поведінку полімерних розчинів при високих температурах, часто доводиться покладатися на лабораторні експерименти та накопичений досвід. Відомо, що більшість експериментальних досліджень полімерних бурових розчинів проводилася за кімнатних умов або при нагріванні до 90–100 °С. Ці результати не завжди достатні для коректної екстраполяції на область 120–150 °С і вище. Тому сьогодні актуальними є розширені дослідження реологічних властивостей безглинистих систем у

розширеному діапазоні температур – аж до 150–180 °С. Такі дослідження дозволяють глибше зрозуміти зміну властивостей розчину при нагріванні та оптимізувати рецептури для роботи у свердловинах з високою температурою пласта.

Біополімерні безглинисті розчини відіграють важливу роль у забезпеченні якісного розкриття продуктивних горизонтів завдяки своїй здатності мінімізувати кольматацію пластів. Їхній низький показник фільтрації в пористе середовище досягається, зокрема, завдяки цілеспрямованому вводу кольматуючих добавок певного гранулометричного складу. Частинки кольматанту у співпраці з біополімерною матрицею утворюють на стінках свердловини та в привибійній зоні пласта своєрідні аркові перемички, блокуючи канали фільтрації[29]. Для оптимального підбору розміру таких частинок керуються правилом Абрамса та теорією ідеальної гранупаковки Кауффмана. Правило Абрамса стверджує, що для початку утворення стійких “арок” між зернами породи середній розмір частинок кольматанту має перевищувати $1/3$ середнього діаметра пор породи (часто беруть $1/3$ – $1/2$ порового каналу). На практиці це означає, що знаючи характерний розмір пор (з каротажу або лабораторних досліджень порід), можна підібрати необхідний середній розмір частинок ущільнювача. Теорія ідеальної упаковки (Кауффера) використовується для визначення оптимального гранулометричного складу суміші кольматувальних матеріалів. Графічним методом будують криву розподілу розмірів частинок, яка якнайповніше заповнює проміжки між найбільшими зернами, забезпечуючи мінімальну проникність утвореної кірки. Цей метод дозволяє також оцінити необхідну концентрацію кольматанту. Звичайно, для його застосування потрібна достатньо повна і точна інформація про поровий простір пласта, яка не завжди доступна. Тому для надійності часто використовують композитні кольматанти, що поєднують у собі тверді та еластичні фракції. Така комбінація дозволяє компенсувати недоліки кожного типу матеріалу: тверді частинки створюють міцний каркас, а пружні компоненти – заповнюють дрібні шпари і

надають кірці гнучкості (рис. 1.3). Композитні кольматанти формують еластично-міцний ізолюючий шар, ефективний навіть при пульсаціях тиску і динамічних навантаженнях на стінку свердловини. В процесі утворення цього шару менші та м'якші частинки деформуються і заповнюють проміжки між більшими жорсткими гранулами та зернами породи, утворюючи непроникну “прокладку” незалежно від геометрії порожнин колектора [30].

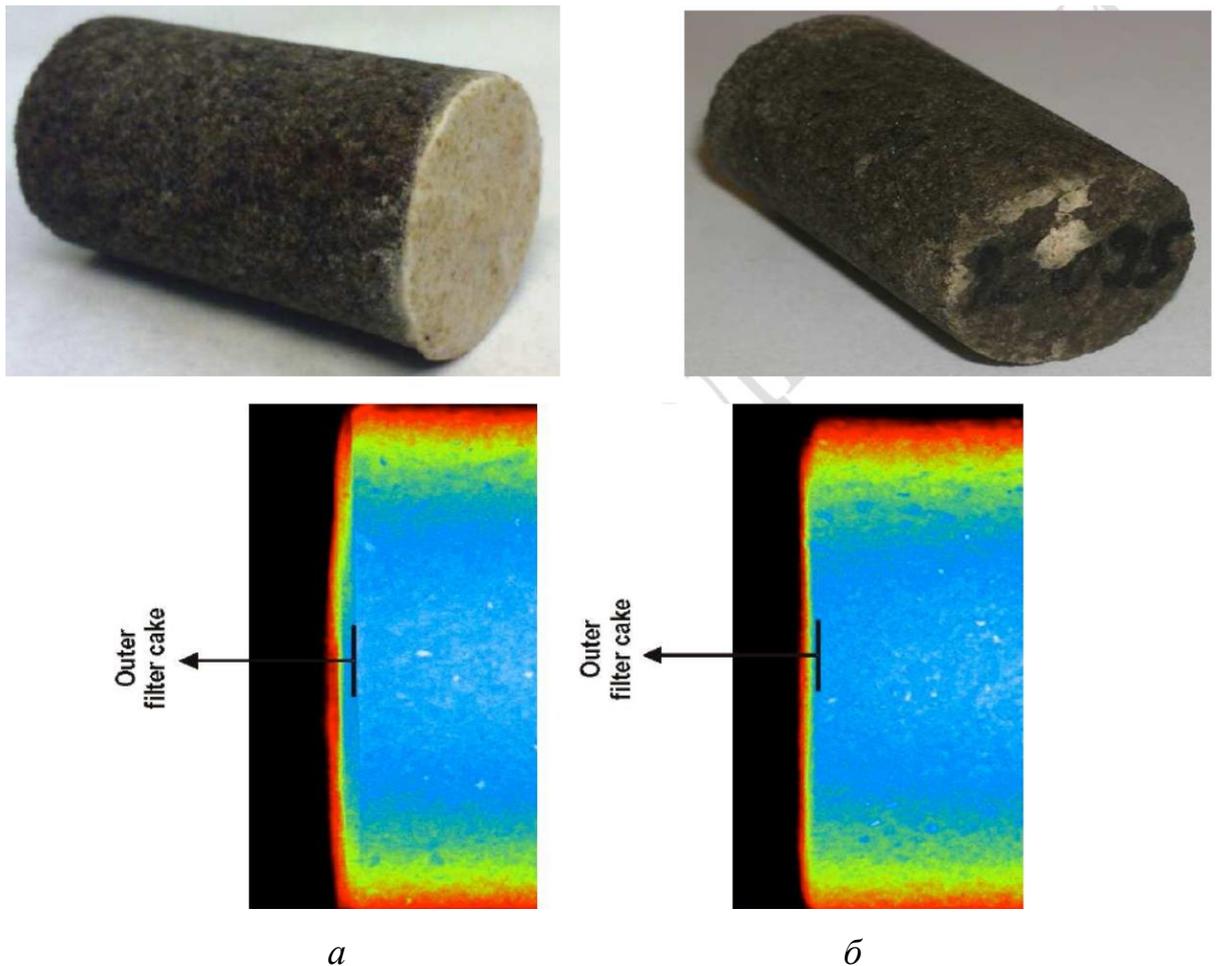


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд та рентгенівські знімки зразків керна після прокачування бурового розчину із композитним кольматантом (а) і при кінцевому визначенні проникності (б)

Застосування композитних кольматуючих сумішей дозволяє сформувати на стінках вибою надзвичайно тонку та щільну фільтраційну кірку, яка майже повністю запобігає проникненню фільтрату в пласт. Це сприяє швидкому

відновленню пластового тиску після розкриття і мінімізує зону проникнення фільтрату. При цьому за рахунок еластичності внутрішня кірка легко руйнується при прикладанні невеликого диференціального тиску в зворотному напрямку або при запуску свердловини, тому проникність пласта після очистки від кольматанту відновлюється на 90–95%. Таким чином, сучасні полімерні бурові розчини дозволяють ефективно вирішувати завдання захисту і розкриття продуктивних пластів.

Новітні досягнення. Останні 10–15 років характеризуються інтенсивними дослідженнями, спрямованими на підвищення термостійкості та функціональності бурових розчинів на полімерній основі. Одним із напрямів стало поєднання різних полімерів у складі промивальних систем. Зокрема, встановлено, що суміш двох біополімерів може давати кращий ефект, ніж кожен окремо. Наприклад, експериментальні дослідження показали, що додавання до ксантанового розчину діутанової камеді суттєво підсилює його реологічні показники та зменшує фільтрацію. Мул з 1:1 співвідношенням ксантану і діутану продемонстрував підвищені значення пластичної в'язкості, густини гелю, коефіцієнтів консистенції та ін., а також на 16–34% меншу величину АРІ-фільтрації після термообробки при 25, 100 і 120 °С порівняно з системою тільки на ксантані [31][32]. Більш того, зазначена біополімерна комбінація виявилася стійкішою до забруднення сольовим розчином (NaCl) і спричиняла менше зниження проникності пласта, тобто мала менший шкодочинний вплив на колектор [33]. Ці результати підтверджують перспективність синергетичних сумішей біополімерів для вдосконалення властивостей бурових розчинів.

Іншим важливим напрямом є розробка нових полімерних добавок з підвищеною термо- та солестійкістю. Зокрема, створено спеціальні синтетичні полімери – наприклад, амфотерний полімер РЕХ – що здатні працювати в умовах 180–220 °С. В лабораторних випробуваннях додавання лише 0,3% такого полімеру (РЕХ) до водного бурового розчину збільшувало його реологічні параметри (в'язкість, напруження зсуву) більш ніж на 60% та

знижувало втрату фільтрату на 63,5% при температурі 180 °С [34][35]. Цей амфотерний полімер перевершив за ефективністю традиційні добавки (РАС, ПАА) – він не тільки покращував реологію і знижував фільтрацію, але й значно підвищував термостабільність розчину [35][36]. Завдяки жорсткій розгалуженій структурі і наявності іоногенних груп, молекули РЕХ зберігають свою функціональність за високої температури, що дозволяє стабільно застосовувати його в розчинах для глибоких і гарячих свердловин. Реологічна поведінка таких систем також добре описується моделлю Гершеля–Балклі [37][23].

Паралельно вдосконалюються хімічно модифіковані природні полімери. Для розширення температурного діапазону застосування біополімерів їх піддають хімічній модифікації – наприклад, шляхом зшивання або прищеплення синтетичних мономерів. Нещодавно було отримано похідну ксантанової камеді, синтезовану прищепленням акрилових мономерів (акрилової кислоти, акриламідю та 2-акриламідю-2-метилпропансульфонової кислоти) до полісахаридного ланцюга [38][39]. Цей модифікований біополімер (позначається як ХG-AA/AM/AMPS) продемонстрував здатність стабілізувати буровий розчин при температурах до 180 °С. Зокрема, у складі бурового розчину з псевдопіною (колоїдно-газовим афроном) він забезпечував прийнятні реологічні властивості (виражену псевдопластичність, високі в'язкості при низьких швидкостях зсуву) і обмежував фільтрацію до ~13,5 мл навіть при 140–180 °С [40][41]. Аналіз показав, що висока термостійкість цього прищепленого ксантану зумовлена поєднанням двох ефектів: зміцненням структурної сітки полімеру (внаслідок його часткового зшивання акриловими ланками) та додатковою стабілізацією псевдопіни (пухирців повітря), яка діє як буфер і перешкоджає утворенню суцільної фільтраційної кірки [38][42]. Отримані результати відкривають шлях до створення екологічно чистих полімерних реагентів для буріння глибоких свердловин.

Ще одним перспективним шляхом підвищення ефективності біополімерних розчинів є використання наноматеріалів. Додавання

наночастинок (окислів кремнію SiO_2 , титану TiO_2 , цинку ZnO тощо) до полімерних бурових розчинів показало здатність суттєво покращувати їх властивості за високих температур і тисків [43][44]. Наночастинки, завдяки великій питомій поверхні і активним поверхневим групам, взаємодіють з полімерною матрицею розчину та частками глини, сприяючи зміцненню структури і зменшенню фільтрації. Наприклад, дослідження показали, що додавання діоксиду титану до полімерного розчину збільшувало термічну стабільність і стійкість шламу – відсоток відновлення глинистих гранул після гарячого ролера зростав до ~97%, а об'єм фільтрату знижувався на 27% [45]. Використання композиційних мікро- і нанодобавок на основі полімерів та діоксиду кремнію дозволило підвищити термостійкість розчинів, знизити втрати фільтрату і поліпшити змащувальні властивості (зменшити коефіцієнт тертя) [46]. В іншому експерименті встановлено, що одночасне введення відносно невеликих концентрацій біополімеру і наноматеріалу (близько 0,25% того й іншого) значно покращує реологію та фільтрацію розчину в інтервалі температур 25–85 °C [47][48]. Зокрема, зростали значення пластичної в'язкості та виходу гелю, а об'єм фільтрату зменшувався. Застосування наноксиду цинку у поєднанні з природними полімерами (наприклад, з трагантовою камеддю) також дало помітний ефект – спостерігалися підвищення показників в'язкості та зниження фільтрації навіть за помірно високих температур (до 120 °C і 3,5 МПа)[49][50]. Окрім того, введення ZnO -нанокompatитів сприяло зменшенню набухання глин (шахтний тест показав зниження набухання з 16% до 9% при 120 °C) і покращенню мастильних властивостей розчину. Таким чином, поєднання біополімерних реагентів із наноматеріалами розглядається сьогодні як перспективне рішення для створення "розумних" бурових розчинів, здатних самоадаптуватися до умов високих температур і тисків [43][44].

Підсумовуючи, сучасний стан розвитку біополімерних бурових розчинів характеризується активним впровадженням нових рецептур і технологій контролю параметрів. Поєднання класичних природних полімерів (таких як

ксантанова камедь) зі спеціальними добавками – стабілізаторами, наночастинками, прищепленими або зшитими полімерними мережами – дозволяє суттєво розширити діапазон їх застосування. Найновіші системи успішно працюють за високих температур (150–180 °С і більше), в умовах високо мінералізованих пластових вод і аномальних тисків. При цьому вони зберігають екологічну безпеку водних розчинів і мінімальний негативний вплив на продуктивні пласти. Така еволюція біополімерних бурових розчинів відкриває нові можливості для ефективного і безпечного буріння свердловин у складних гірничо-геологічних умовах.

1.4 Висновки до розділу 1 Мета і задачі дослідження

1. Безглинисті біополімерні тиксотропні бурові розчини належать до сучасних промивальних систем, створених на підставі тривалих досліджень у хімії бурових рідин. Основу таких складів становить біополімер — ксантанова камедь, яка в поєднанні з полісахаридними стабілізаторами формує тиксотропну безглинисту систему з вираженою псевдопластичною поведінкою. Нині ці розчини помітно впливають на розвиток технологій буріння нафтових і газових свердловин.

2. Вибір рецептур безглинистих промивальних систем для глибокого буріння значною мірою визначається їх реологічними та фільтраційними характеристиками в НРНТ-умовах, оскільки саме вони відображають параметри на вибої. Попри те, що біополімерні безглинисті розчини досліджувалися при температурах до 100 °С, цього рівня знань недостатньо для результативного застосування на окремих родовищах Дніпровсько-Донецької западини, де пластові температури сягають 120–140 °С і перевищують ці значення.

3. Обмеження фільтрації в безглинистих бурових розчинах під час розкриття проникних пластів забезпечують, як правило, шляхом введення тонкодисперсних мармурових кольматантів. Підбір їх гранулометричного складу виконують із використанням математичних моделей, що потребують

достовірних даних про порову будову колектора. Проте для неоднорідних і шаруватих покладів, характерних для багатьох родовищ України, такий підхід часто не дає потрібного результату. Перспективним шляхом усунення цього недоліку є застосування композитних кольматантів із додатковою органічною пружною складовою.

Отже, мета роботи полягає у підвищенні результативності застосування біополімерних бурових розчинів під час буріння нестійких теригенних відкладів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Виконати аналіз рецептури біополімерного бурового розчину Біокар.
2. Дослідити технологічні властивості безглинистого біополімерного розчину Біокар у теригенних відкладах.
3. Провести аналіз Копилівського родовища щодо можливості впровадження технології буріння із використанням біополімерного безглинистого розчину Біокар.
4. Реалізувати застосування рецептури Біокар під час розкриття продуктивних горизонтів Копилівського ГКР.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО СКЛАДУ БІОПОЛІМЕРНОГО БУРОВОГО РОЗЧИНУ ДЛЯ БУРІННЯ У НЕСТІЙКИХ ТЕРИГЕННИХ ВІДКЛАДАХ

2.1 Розробка біополімерної системи Біокар, її склад та основні властивості

Біополімерну промивальну систему «Біокар» створили спеціалісти ПВ УкрДГРІ, ПрАТ «НДКБ бурового інструменту» та ТОВ «Геосинтез інженірінг» у період 2001–2003 рр. [37]. Нині виготовлення компонентів, промислове застосування, а також інженерно-сервісний супровід цієї системи в основному зосереджені в ТОВ «Геосинтез інженірінг» (м. Полтава), яке спеціалізується на розробленні та впровадженні промивальних систем і супроводі їх роботи на свердловинах.

Система Біокар відноситься до класу безглинистих водних бурових розчинів на основі полісахаридів. Її технологічні властивості формуються завдяки узгодженій дії ксантанового біополімеру (в'язко-пружна матриця, псевдопластичність, підйомна здатність) та модифікованого (етерифікованого) крохмалю (контроль фільтрації, стабілізація параметрів і формування тонкої малопроникної кірки). Для безглинистих систем така комбінація є типовою, оскільки крохмаль у модифікованих формах широко застосовують саме як реагент зниження фільтрації, тоді як ксантан — як основний загущувач і «носій» реології.

Приготування розчину здійснюють послідовно: у воді диспергують полімерну основу системи — комплексний реагент Біокар-компаунд, після чого вводять інгібітор (KCl), регулятор рН (РПС), бактерицид (Biostat/PSPW) і мастильну композицію. Така схема є технологічно обґрунтованою: коригування рН підтримує стабільність полісахаридів і керує їх гідратацією; біоцид пригнічує мікробіологічне руйнування крохмалю/біополімерів під час

зберігання та циркуляції; мастильні добавки зменшують коефіцієнт тертя, крутний момент і ризик прихватів у складних профілях стовбура. У відкритих описах реагент «Біокар-компаунд» позиціонується як полімерна база для формування безглинистого розчину БЮКАР із заданими реологічними та структурно-механічними характеристиками.

Базову рецептуру біополімерної системи Біокар із густиною 1090–1180 кг/м³ створено та застосовували під час буріння на відносно невеликих глибинах 2500–3000 м за температур до 110–120 °С [17]. Для підвищення густини та узгодження гідростатичного тиску з пластовими умовами виконують обважнення водорозчинними солями, отримуючи мінералізовані модифікації: NaCl (до 1180–1230 кг/м³), CaCl₂ (до 1200–1360 кг/м³), Ca(NO₃)₂ (до 1320–1490 кг/м³). Такий підхід, окрім регулювання густини, змінює іонну силу середовища та активність води, що впливає на гідратацію полімерів і перебіг фільтрації. Саме тому обважнений Біокар, порівняно з базовим складом, зазвичай демонструє підвищену термостійкість, що дозволяє використовувати його на глибинах 4500–5700 м при 120–140 °С [35]. Для кількісної оцінки впливу рецептурних змін характер коливань параметрів доцільно аналізувати за результатами лабораторних вимірювань (реологія, структурно-механічні показники, фільтрація), виконаних у стандартизований спосіб. Під час контролю властивостей водних розчинів у практиці часто орієнтуються на процедури ISO 10414-1 та API RP 13B-1 (густина, в'язкість/гелі, фільтрація LTLR/HPHT, вміст солей тощо).

Підвищення концентрації біополімеру закономірно веде до загального зростання в'язкості та міцності структури (виразніша псевдопластичність), а також може давати помірне зниження фільтрації за рахунок формування більш щільної полімерної кірки. Модифікований крохмаль, виконуючи роль стабілізатора й реагенту контролю фільтрації, зазвичай суттєвіше зменшує водовіддачу; водночас як побічний ефект часто спостерігається додаткове загущення. Введення KCl у робочих концентраціях зазвичай призводить до незначного розрідження (електролітний ефект на полімерні ланцюги) і при

цьому майже не змінює фільтрацію безпосередньо; його основна функція — інгібування глинистих порід через дію K^+ (зменшення гідратації/набухання, стискання дифузного подвійного шару, іонний обмін у міжшаровому просторі).

Зростання вмісту твердої фази (шлам, мікротверді домішки, введені матеріали) очікувано підвищує густину та посилює структуроутворення, що відображається в підвищенні пластичної в'язкості й динамічної напруги зсуву.

Нарощування сумарної мінералізації за рахунок **NaCl** зазвичай не дає відчутного ефекту на фільтрацію, проте супроводжується збільшенням густини й помірним «розрідженням» системи. Водночас слід враховувати, що змішані сольові склади можуть впливати і на інгібувальну здатність калійних систем: у ряді досліджень відмічено, що присутність NaCl здатна змінювати ефективність KCl-інгібування (через конкуренцію іонів та зміну умов катіонного обміну).

Термостійкість системи проявляється як сповільнення термодеструкції полісахаридних реагентів, що після термостатування забезпечує меншу фільтрацію та збереження вищих реологічних характеристик порівняно з маломінералізованими аналогами. Для ксантанвмісних систем відомо, що деградація різко посилюється на підвищених температурах, зокрема поблизу та вище ≈ 140 °C, особливо за умов старіння/навантаження зсувом, тому вибір рівня мінералізації та пакета стабілізаторів є критичним для верхньої температурної межі застосування.

З цієї причини термостатування за 140 °C можна вважати найбільш показовим («стресовим») режимом для оцінювання працездатності таких біополімерних систем: за недостатніх концентрацій солей/стабілізуювальних факторів можлива майже повна термічна деструкція полімерів, що проявляється стрибком фільтрації та різким падінням реологічних і структурно-механічних властивостей.

Надалі, якщо не зазначено інше, наведені параметри бурових розчинів, отримані після термостатування на водяній бані 2 години при 85–90 °C з

подальшим охолодженням до кімнатної температури. Умовну в'язкість визначали за прийнятим співвідношенням 200/100 мл.

За збільшення вмісту солей «електролітне» розрідження поступово стає менш вираженим, а показник фільтрації — навіть за концентрацій, близьких до межі розчинності — може виходити на технічно прийнятний рівень. У підсумку, дія ключових реагентів у системі Біокар, незалежно від ступеня мінералізації, узгоджується із загальними закономірностями, притаманними безглинистим біополімерним буровим розчинам.

2.2 Технологічні характеристики біополімерних систем у умовах високотемпературних нестійких теригенних покладів

Застосування безглинистих біополімерних промивальних рідин у теригенних товщах на великих глибинах, особливо за високих пластових тисків і температур, супроводжується низкою специфічних проблем. Ключовою з них є обмежена термічна стабільність полісахаридних реагентів, які формують реологію та фільтраційні властивості таких систем. Додатково ситуацію ускладнює те, що в безглинистих розчинах частка активної твердої фази значно менша, ніж у традиційних полімер-глинистих системах, а отже механізми структуроутворення та температурної поведінки істотно відрізняються.

Для більшості глинистих суспензій характерне зростання в'язкості та структурно-механічних показників зі збільшенням температури (через посилення взаємодії частинок і зміну стану дисперсної фази). Натомість для безглинистих біополімерних систем переважає протилежна тенденція: при нагріванні спостерігається загальне розрідження та ослаблення структури (рис. 2.1). Це пов'язано з тим, що визначальну роль відіграє не глиниста матриця, а полімерна сітка, чутлива до температури, мінералізації, швидкості зсуву й часу термічної дії.

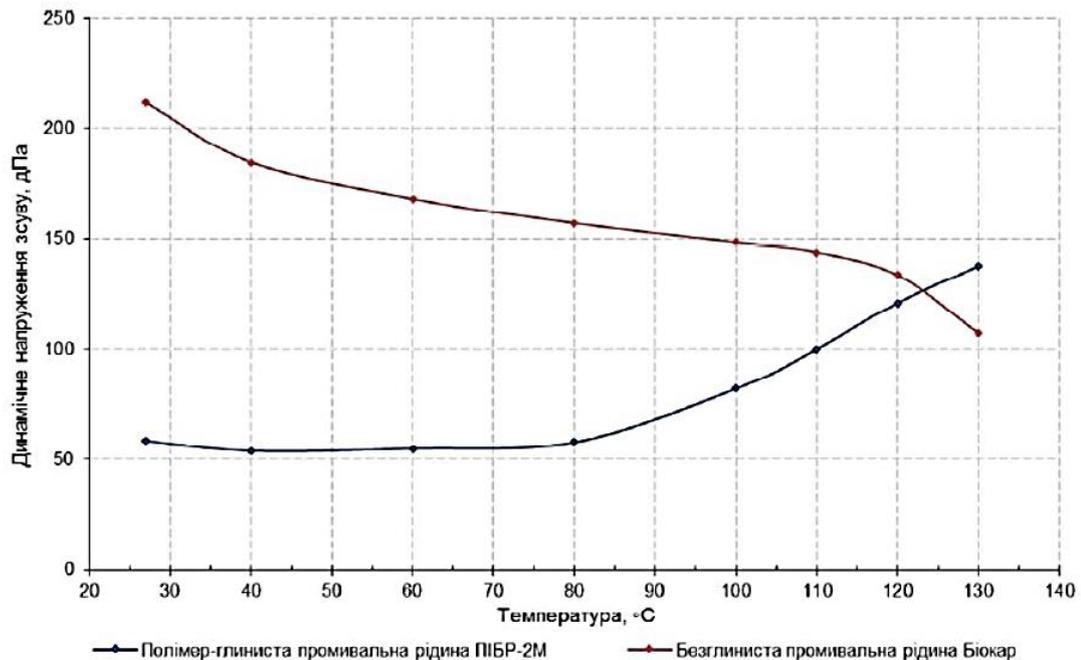


Рисунок 2.1 – Залежність динамічної в'язкості (ДНЗ) від температури.

З огляду на зазначені відмінності практичні підходи, що добре працюють для глинистих бурових розчинів у високотемпературних умовах, не можна механічно переносити на біополімерні безглинисті системи. Виникає необхідність у спеціальних дослідженнях, які б окремо оцінювали вплив температури на реологію, фільтрацію та стабільність полімерної основи з подальшим обґрунтуванням методів регулювання параметрів під конкретні термобаричні умови.

Біополімерний безглинистий буровий розчин «Біокар», як система на основі полісахаридних реагентів, характеризується вираженою псевдопластичною (зсуворозріджувальною) поведінкою. Його реологічні параметри швидко зменшуються зі зростанням швидкості зсуву, що полегшує прокачування, знижує гідравлічні втрати та ризик надмірного зростання еквівалентної циркуляційної густини. Одночасно при зменшенні швидкості зсуву (або в умовах спокою) в'язкість і структурна міцність відновлюються, що позитивно впливає на винос шламу та утримання зважених частинок. Підвищення температури, своєю чергою, призводить до закономірного розрідження розчину і зменшення ступеня псевдопластичності (рис. 2.2),

тобто знижується різниця між «високозсувною» та «низькозсувною» реологією.

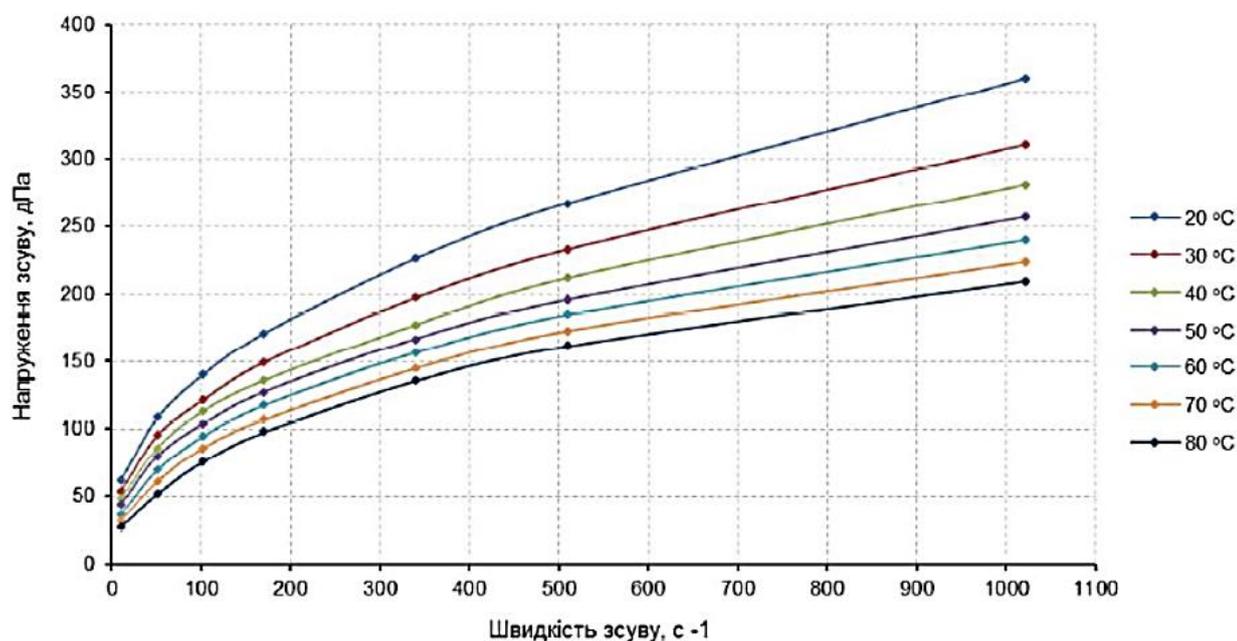


Рисунок 2.2 – Реологічні криві біополімерної системи "Біокар".

Як і для більшості безглинистих систем на основі ксантанового біополімеру та модифікованих крохмалів [25], температурні зміни в «Біокарі» в інтервалі до 80–90 °C мають повністю оборотний характер. Після охолодження розчин відтворює вихідні реологічні характеристики, що вказує на відсутність істотної деградації полімерної структури у цьому діапазоні. Додатково термостатування при 80–90 °C практично не змінює стандартний показник фільтрації через паперовий фільтр: водовіддача зберігається на стабільно низькому рівні, а сформована фільтраційна кірка залишається технологічно придатною.

Підвищення температури до 120 °C викликає вже помітніші зміни. Фільтрація може дещо зрости, однак у більшості випадків не виходить за критичні межі та залишається прийнятною для практичного застосування. Водночас саме реологічні та структурно-механічні властивості реагують сильніше: їх значення істотно зменшуються і можуть досягати рівнів, що є потенційно небезпечними для процесу буріння [17]. Наслідками такого

погіршення можуть бути ускладнені з очищенням стовбура, падіння здатності до транспортування шламу, погіршення суспензійної стабільності та зростання ризиків прихватів. У лабораторних пробах після прогрівання фіксувалися непрямі ознаки термічного руйнування полімерів, зокрема поява осаду, відстій фільтрату, а також збільшення коефіцієнта тертя кірки (КТК) та інші прояви погіршення стану системи.

За температури 140 °C спостерігалось повне руйнування системи, що проявлялось розшаруванням та втратою більшості корисних технологічних властивостей. З цього випливає припущення, що гранична робоча температура для розчину «Біокар» у варіанті, який містить лише 3–5% КСІ і не має додаткових солей, імовірно не перевищує 120 °C. Більш коректно визначати межу термостійкості доцільно не за одиничним показником, а на підставі комплексних реологічних досліджень [36], що дозволяє враховувати критичні зміни саме у полімерній складовій.

Як зазначалось раніше, після досягнення певної критичної температури, яку пропонується позначати T_m , інтенсивність падіння в'язкості розчину ксантанового біополімеру різко зростає. Фізично це відповідає початку руйнування впорядкованої (структурованої) конфігурації полімерних ланцюгів. Температуру T_m визначають як характерну точку перегину на залежності напруження зсуву (або в'язкості) від температури: до T_m зміни відбуваються відносно плавно, а після T_m деградаційні процеси або структурні перебудови розвиваються значно інтенсивніше. Оскільки аналогічна «точка зламу» зберігається і для багатокомпонентних безглинистих біополімерних бурових розчинів, показник T_m можна поширити на такі системи й застосовувати як практичний критерій їх термічної стабільності.

Важливо, що температура T_m є сталою величиною для конкретної композиції й не залежить від швидкості зсуву, тобто відображає внутрішню термічну межу стабільності полімерної структури. Це дозволяє визначати T_m за кривими, одержаними при різних режимах зсуву. З рис. 2.6 видно, що точки перегину для кривих, виміряних на різних швидкостях, припадають на одну й

ту саму температуру, яка й задає межу термостійкості: для бурового розчину з мінералізацією 15% отримано $T_m = 130$ °С. Водночас встановлено, що інтерпретація результатів при високих швидкостях зсуву є більш наочною. Тому надалі (якщо не зазначено інше) для визначення T_m залежності напруження зсуву (в'язкості) від температури будували на основі вимірювань при 600 об/хв.

Доцільність використання температури T_m як індикатора термічної стабільності біополімерних безглинистих систем підтверджується результатами додаткових випробувань. Для двох лабораторних проб «Біокару» з вмістом NaCl 12% та 25% визначено значення T_m , які становили відповідно 125 і 135 °С. Після цього кожен пробу поділили на дві частини та піддавали багаторазовим послідовним прогріванням за температур, що були або нижчими, або вищими за встановлені T_m для відповідної композиції. Для системи з мінералізацією 12% ($T_m = 125$ °С) застосовували температури 120 і 130 °С, а для системи з мінералізацією 25% ($T_m = 135$ °С) – 130 і 140 °С. Після кожного циклу прогрівання визначали стандартну фільтрацію в нормальних умовах.

Метою цих досліджень було встановити, як змінюється показник фільтрації внаслідок тривалої температурної дії та чи проявляється «порогова» поведінка при перевищенні межі термічної стійкості. Очікувалося, що при температурах, більших за T_m , фільтрація зростатиме швидко (через деградацію полімерів і погіршення якості кірки), тоді як при прогріванні нижче T_m показник залишатиметься відносно стабільним. Отримані результати наведені на рис. 2.3.

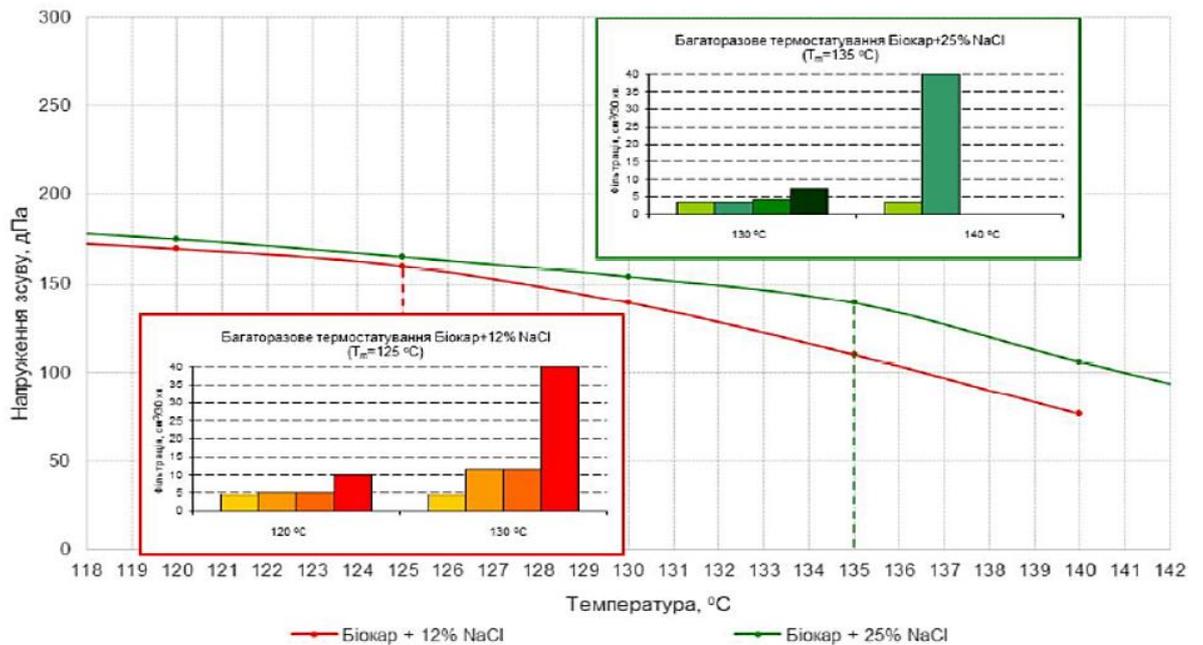


Рисунок 2.3 – Зростання фільтрації біополімерного безглинистого розчину при перевищенні межі його термічної стійкості T_m

На рисунку 2.4 наведено характер зміни фільтрації біополімерного безглинистого розчину у випадку, коли температура перевищує межу його термічної стабільності T_m . Отримані дані демонструють, що прогрівання бурового розчину за температур, вищих за T_m , супроводжується втратою фільтраційної стійкості системи та різким збільшенням показника фільтрації. Визначальним чинником при цьому є не сама по собі абсолютна температура, а її положення відносно критичного порога термостійкості, тобто відносно температури T_m .

Це добре ілюструє порівняння двох проб. Температура 130 °C виявилася критичною для системи з мінералізацією 12% ($T_m = 125$ °C), оскільки перевищення порогового значення спричинило швидке погіршення фільтраційних характеристик. Водночас для проби з мінералізацією 25% ($T_m = 135$ °C) нагрівання до 130 °C не викликало стрімкого росту фільтрації, оскільки робоча температура залишалася нижчою від межі термічної стійкості цієї композиції. Важливо, що досліджувані розчини мали однаковий полімерний склад і відрізнялися між собою лише ступенем мінералізації, тобто фактично лише значенням T_m . Це дозволяє зробити висновок, що температура

T_m однозначно окреслює межу термічної стабільності біополімерної безглинистої системи та може використовуватися як її об'єктивний критерій.

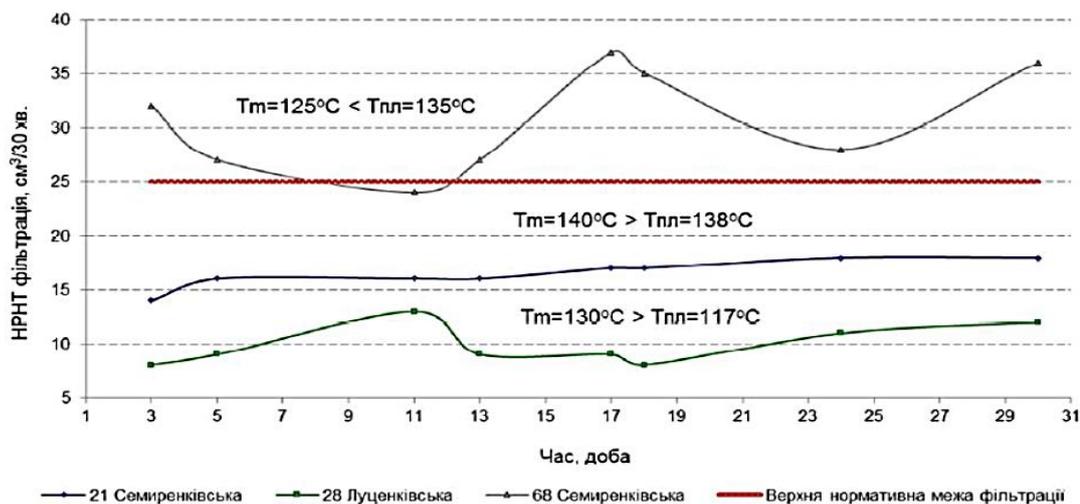


Рисунок 2.4 – Результати дослідження вибівної фільтрації при бурінні свердловин з використанням біополімерного бурового розчину

За своєю фізичною суттю величина T_m відповідає температурі початку інтенсивної термічної деструкції полімерної основи безглинистого бурового розчину. Після переходу через цей поріг полімерна структура втрачає здатність підтримувати сталі реологічні та фільтраційні властивості: знижується ефективність структуроутворення, погіршуються умови формування фільтраційної кірки, а водовіддача стає нестабільною і зростає.

У разі застосування біополімерних безглинистих бурових розчинів у свердловинах із пластовими температурами, що перевищують T_m , система за короткий час переходить у нестійкий стан. Найшвидше це проявляється у зменшенні реологічних показників та посиленні вибівної (пластової) фільтрації, що погіршує технологічну керованість процесу буріння. І навпаки, за роботи в межах встановленої термічної стабільності ($T < T_m$) параметри безглинистих систем, як правило, зберігаються в часі значно стабільніше, а необхідність у додаткових обробках і коригуванні рецептури виникає рідше (рис. 2.5).

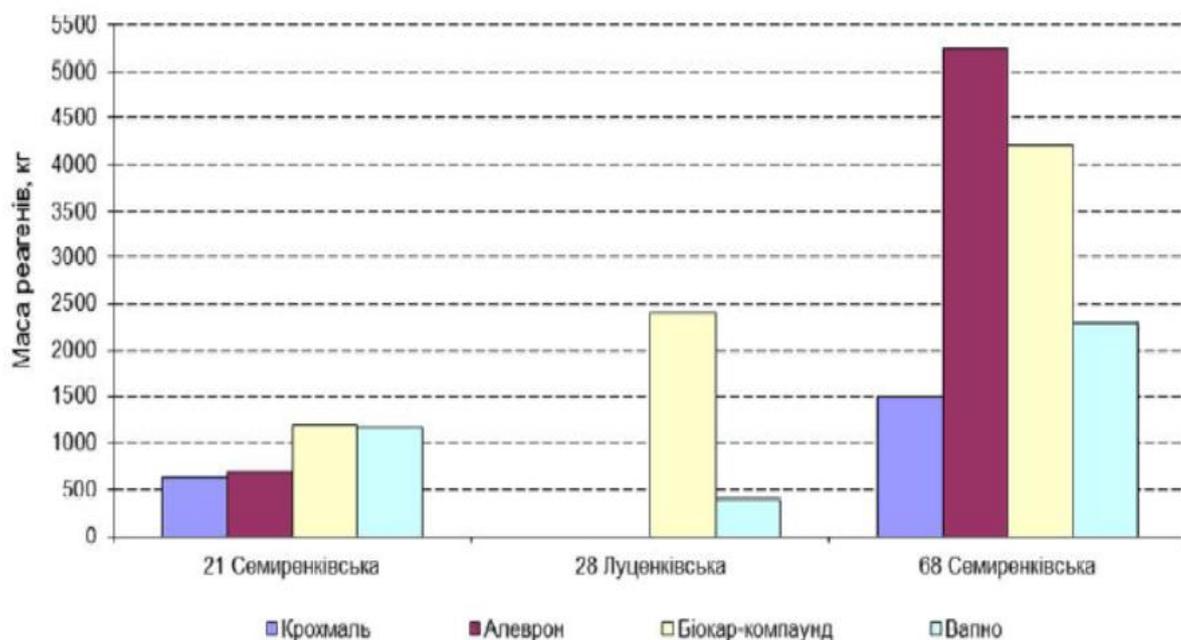


Рисунок 2.5 – Витрати основних та додаткових хімічних реагентів на свердловинах за період спостережень за НРНТ фільтрацією

Отже, температура T_m дає змогу швидко оцінити, наскільки конкретна біополімерна система відповідає термічним умовам свердловини, і забезпечити потрібні технологічні властивості з мінімальними витратами хімічних реагентів. На практиці це спрощує вибір рівня мінералізації та режимів підтримання властивостей розчину, знижуючи ризики втрати стабільності при наближенні до критичного температурного порога.

2.3 Особливості застосування солей в біополімерних системах для покращення властивостей розчину

Підвищення термічної стійкості безглинистих біополімерних бурових розчинів під час збільшення мінералізації пов'язане з введенням солей, що одночасно підвищує густину системи та змінює іонну силу середовища. У результаті полімерна основа в таких умовах зазвичай повільніше втрачає робочі властивості при нагріванні, а критична межа термостійкості зміщується у бік вищих температур. Додаткове введення солі є важливим і з погляду

інгібування глинистих порід: за рахунок зменшення активності води та специфічної дії окремих катіонів знижується гідратація й набухання глин, що позитивно впливає на стійкість стовбура. Подібні ефекти є корисними при створенні біополімерних промивальних систем для буріння на значних глибинах, зокрема під час проходження інтервалів АВПТ та зон, схильних до осипань і нестійкості порід. У підвищено мінералізованих середовищах також слабшає біологічна активність, тому з'являється можливість оптимізувати пакет протимікробних добавок і, в окремих випадках, зменшувати потребу в бактерицидних реагентах (за умови контролю мікробіологічних ризиків).

Полісахаридні полімери, які формують основу системи Біокар, загалом характеризуються відносно високою солестійкістю до моно- та полівалентних електролітів. Це відкриває можливість формування різних сольових композицій, у тому числі на базі форміатів і бромідів, що застосовують у високотемпературних або високощільних рідинах. Разом з тим економічні та логістичні чинники зазвичай обмежують вибір реагентів найбільш доступними солями, тому в дослідженнях найчастіше використовують хлорид натрію (NaCl), хлорид кальцію (CaCl_2) та нітрат кальцію ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Дані літератури також підтверджують, що ксантанові системи можуть зберігати працездатність у високомінералізованих середовищах, хоча температурний фактор залишається визначальним для довготривалої стабільності.

Хлорид натрію розглядають як найбільш доцільний та ефективний з практичної точки зору інструмент підвищення термостійкості біополімерних систем при бурінні на великі глибини, оскільки він поєднує доступність, прогнозований вплив на властивості та можливість формувати потрібну густину без складних реагентних схем. У випадку системи Біокар застосування NaCl дає змогу утримувати густину на рівні 1220–1230 кг/м³. Водночас додавання хлориду натрію, особливо у відносно невеликих концентраціях, часто супроводжується певним розрідженням системи, тобто зменшенням в'язкості та частковою втратою структурної міцності. Саме тому для збереження необхідних реологічних і структурно-механічних параметрів

у мінералізованих варіантах підтримують дещо підвищені концентрації полісахаридних реагентів. При цьому принципи регулювання властивостей для біополімерної системи Біокар із NaCl залишаються загалом такими ж, як і для базової рецептури: коригують рівень полімерів і допоміжних добавок відповідно до вимог щодо реології, фільтрації та стабільності в часі. У промисловій практиці контроль таких показників зазвичай виконують за стандартними методиками польових випробувань (густина, реологія, фільтрація, у тому числі НРНТ).

За критичного вмісту NaCl (25–27 %) систему Біокар можна застосовувати при вибійних температурах до 140 °С. Біополімерна система на основі хлориду натрію має виробниче застосування, зокрема на свердловинах 53 і 59 Свиридівська, 24 Островецька та інших. Хлорид кальцію забезпечує можливість отримання обважнених бурових розчинів з густиною 1340–1360 кг/м³, однак його вартість, як правило, суттєво вища (за наведеними оцінками — майже в 10 разів) порівняно з хлоридом натрію. Для безглинистої біополімерної системи Біокар, обважненої CaCl₂, показник фільтрації залишається низьким при температурах до 100 °С і може мати тенденцію до зниження зі збільшенням концентрації солі, що пояснюється формуванням більш щільної фільтраційної кірки. Проте при подальшому підвищенні температури фільтрація зростає, а значення НРНТ/НРНТ-фільтрації, як правило, є вищими, ніж у випадку використання одновалентних солей. Це пов'язується із більш складним впливом двовалентних катіонів на гідратацію полімерів і структуру фільтраційної кірки. У практиці при роботі за температур понад 100 °С часто фіксують збільшення витрат полісахаридних реагентів, оскільки для компенсації температурного розрідження та деградаційних змін необхідно підтримувати реологічні параметри на безпечному для буріння рівні.

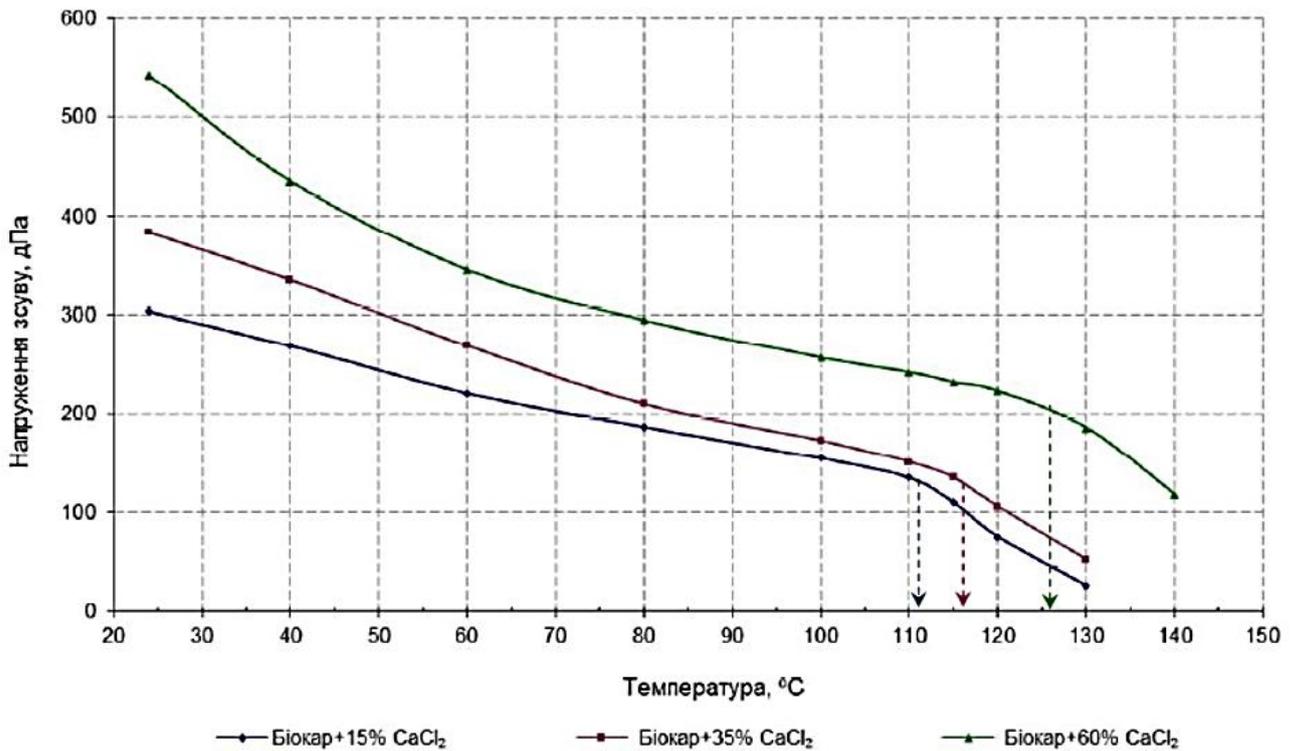


Рисунок 2.6 – Визначення температури T_m біополімерної системи Біокар, що обважнена хлоридом кальцію

Нітрат кальцію застосовують для обважнення біополімерних безглинистих бурових розчинів до густини 1480–1490 кг/м³. Таке обважнення, насамперед, пов'язують зі зміною кислотно-лужних умов середовища у бік нижчих значень рН. У результаті полісахаридна основа втрачає стабільність: відбувається деградація полімерних ланцюгів, що проявляється погіршенням технологічних показників і найбільш відчутно спостерігається за підвищених температур. Для компенсації цих процесів зазвичай доводиться збільшувати витрати реагентів, передусім регуляторів рН та полімерів-структуроутворювачів. Важливо враховувати, що для ксантанових систем у високомінералізованих середовищах робочий інтервал рН є критичним, а вихід за оптимальні межі прискорює втрату в'язкості та погіршує керованість реологією.

За вартісними характеристиками нітрат кальцію суттєво дорожчий за хлорид натрію і зазвичай наближається за ціною до хлориду кальцію. Тому з

практичних і економічних міркувань, а також для послаблення негативного впливу «кислої» солі, доцільним є використання комбінованих сольових композицій, зокрема сумішей нітрату кальцію з NaCl. Такий підхід дозволяє частково рознести функції: нітрат кальцію забезпечує потрібний рівень густини, а хлорид натрію зменшує загальну вартість обробки та робить регулювання властивостей більш прогнозованим.

За відносно невисоких температур введення нітрату кальцію в біополімерну безглинисту систему, особливо у значних концентраціях, може супроводжуватися підвищенням реологічних параметрів. На цьому фоні часто простежується загальна тенденція до зменшення показників фільтрації в нормальних умовах і поступового послаблення структурно-механічних характеристик. При концентраціях, близьких до критичних, фільтрація може досягати дуже малих значень, що є характерним і для обважнення двовалентними солями загалом. Разом із тим слід враховувати специфіку взаємодії кальцієвих солей із ксантаном: навіть за збереження псевдопластичної поведінки можливі конформаційні перебудови ланцюгів, які змінюють «якість» реології та чутливість системи до температури.

Із підвищенням температури реологічні властивості біополімерної системи Біокар, обважненої нітратом кальцію, зменшуються значно інтенсивніше, ніж у варіантах, мінералізованих хлоридом натрію. У цілому поведінка систем, обважнених полівалентними солями, є подібною: розчини з $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ та CaCl_2 , як правило, демонструють нижчу термічну стійкість, причому для нітрату кальцію цей рівень може бути ще меншим. Додатковим практичним чинником є те, що висококонцентровані нітратні розсоли потребують уважнішого контролю сумісності з реагентами та корозійних ризиків (особливо за високих температур), що опосередковано також впливає на витрати хімічного пакета.

Водночас у всіх експериментах показники фільтрації після термостатування при 120 °C залишалися на прийнятному рівні. Таким чином формально виникає суперечність між встановленими значеннями T_m і

низькими величинами фільтрації, визначеними за межами термічної стійкості, що потребує окремого пояснення.

По-перше, сам факт підтверджує, що фільтрація, визначена в нормальних умовах навіть після термостатування, не може виступати головним і єдиним критерієм оцінки термостійкості біополімерних безглинистих систем [17]. Для таких розчинів більш інформативним є аналіз реологічних параметрів і їхньої динаміки у часі. У даному випадку після термостатування за температур, вищих за T_m , реологічні та структурно-механічні показники закономірно знижуються і можуть доходити до недопустимо малих значень з точки зору безпечного ведення буріння. Саме це і є прямою ознакою початку термічної деструкції полімерної основи, навіть якщо фільтрація при «кімнатному» тесті тимчасово не погіршується.

З іншого боку, низькі значення фільтрації на ранніх стадіях необоротних змін можуть свідчити про наявність певного «запасу міцності» системи. Його межі визначаються типом і вмістом полімерних стабілізаторів, а також здатністю системи формувати щільну кірку навіть тоді, коли реологія вже починає деградувати. Тобто перевищення T_m не означає миттєвого руйнування розчину: процес розкладу та втрати властивостей розтягується в часі. У практичних умовах саме в цей період зазвичай спостерігають різкі коливання параметрів циркуляційної системи та вимушене зростання витрат реагентів, які вводять для «підтягування» реології й стабілізації роботи розчину. Підтримувати параметри таким способом можливо протягом певного проміжку часу (див. рис. 2.4 та 2.5), хоча така стратегія не є оптимальною з економічної й технологічної позицій.

Попри це, подібна технологічна можливість інколи використовується. Зокрема, практика підтримання параметрів біополімерних безглинистих систем за межами їх термічної стабільності через підвищення витрат найбільш термостійких полімерних реагентів застосовується під час розкриття виснажених продуктивних пластів на великих глибинах. У таких ситуаціях високий рівень мінералізації може бути небажаним або неприйнятним через

ризик створення надмірного гідростатичного тиску та ускладнень, пов'язаних із еквівалентною циркуляційною густиною. Аналогічний підхід може знадобитися і для забезпечення прийнятних реологічних властивостей у випадку застосування системи, обважненої нітратом кальцію, в умовах високих температур.

Солі, які використовують для обважнення біополімерної безглинистої системи Біокар, одночасно підвищують стійкість глинистих порід у стовбурі свердловини. Накопичено значний досвід застосування хлоридів натрію, кальцію та магнію, а також нітрату кальцію як інгібіторів у складі промивальних рідин [7, 15, 32]. За невеликих концентрацій такі солі зазвичай поступаються КСІ, який часто розглядають як базовий неорганічний інгібітор, однак при концентраціях, що наближаються до насичення, інгібувальний ефект солей-обважнювачів досягає максимуму і може бути дуже високим. Тобто при обважненні водорозчинними солями система фактично отримує додаткові інгібітори, що здатні підсилити стійкість стовбура порівняно з використанням лише КСІ. При цьому для КСІ у практиці часто розглядають діапазон 3–5% як робочий для інгібування, а ефект підсилюють сумішами солей або додатковими інгібіторами.

Окремо слід відзначити мікробіологічний аспект. Відомо, що підвищена мінералізація полісахаридних систем може покращувати їхню ферментативну стійкість, оскільки зменшується активність мікроорганізмів, здатних руйнувати ксантан і крохмаль. Унаслідок цього знижується потреба в найбільш токсичних компонентах — біоцидних реагентах, а при високих концентраціях солей підхід із мінімізацією або виключенням бактерицидів із рецептури стає технологічно можливим (за умови контролю зараження та простоїв). Разом із тим у бурових системах мікробне руйнування полімерів є відомим механізмом втрати в'язкості й властивостей, тому рішення щодо відмови від біоцидів має спиратися на фактичний стан циркуляційної системи, тривалість циклу та якість води.

Включення хлориду натрію до біополімерної безглинистої системи здатне забезпечувати триваліший період стійкості до бактеріального впливу. Навіть за вмісту солі близько 12% протягом тривалих спостережень може не досягатися критичний рівень біологічної активності, після якого деградація полісахаридної основи стає необоротною. Подальше збільшення вмісту NaCl до 15% додатково посилює ферментативну стабільність системи і розширює часовий інтервал її надійної роботи.

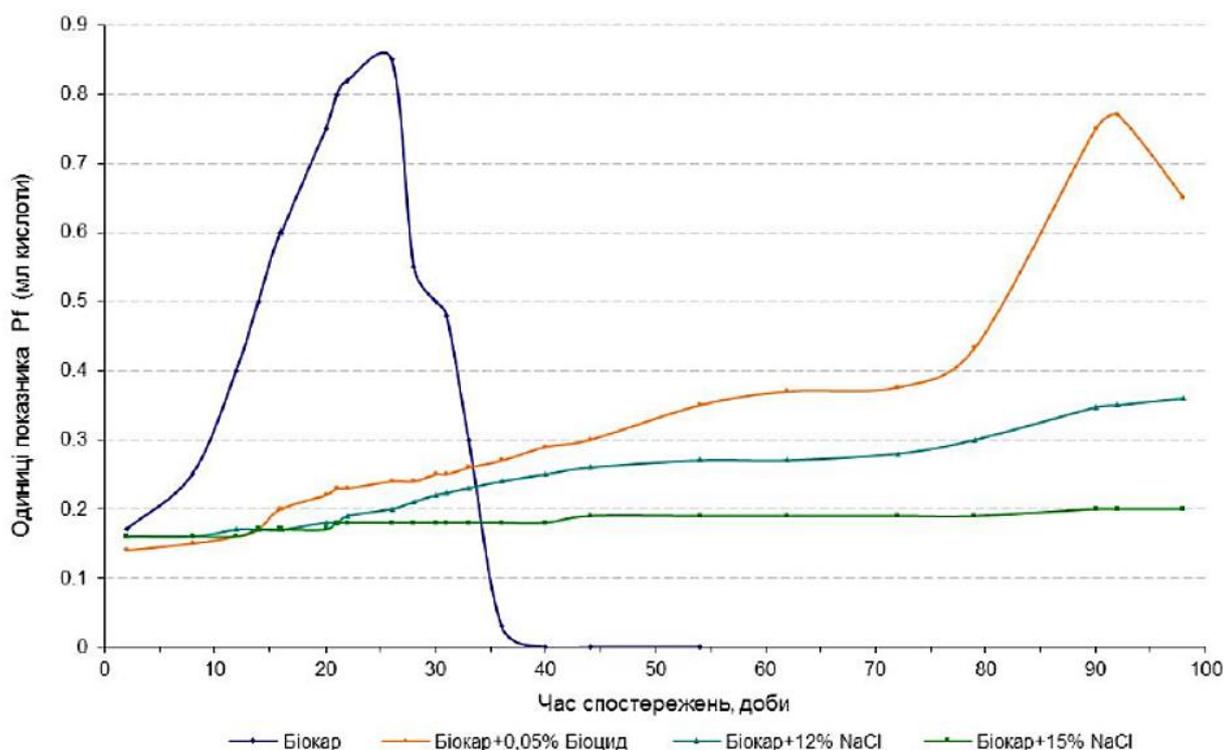


Рисунок 2.7 – Динаміка змін показника Pf у часі як відгук на процеси біополімерної системи "Біокар".

Отже, бактерицидний ефект, який опосередковано виникає при введенні солей у склад бурового розчину, може бути достатнім для пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів, що спричиняють ферментативний розклад полісахаридів. Для системи «Біокар» вміст хлориду натрію на рівні 15% можна розглядати як мінімально доцільний, щоб відмовитися від спеціальних реагентів-бактерицидів, зберігаючи прийнятний рівень стабільності полімерної основи в часі.

2.4 Висновки до розділу 2

1. За підсумками лабораторних досліджень та промислових випробувань виконано обґрунтування базових рецептур біополімерних безглинистих промивальних систем. Встановлено, що система «Біокар» з густиною 1090–1180 кг/м³ доцільна для буріння свердловин глибиною до 3000 м за температур до 110–120 °С, тоді як мінералізована модифікація «Біокар» з густиною 1180–1490 кг/м³ придатна для умов більших глибин (до 4500–5500 м) та підвищених температур (до 120–140 °С), забезпечуючи необхідний рівень керованості властивостей у зазначених інтервалах.

2. Вивчено технологічну поведінку біополімерної системи «Біокар» у теригенних відкладах при високих температурах та визначено ключові закономірності зміни її параметрів. Для оцінювання термостійкості впроваджено підхід реологічної діагностики з використанням ротаційної віскозиметрії, а температуру T_m застосовано як інформативний показник, що характеризує момент початку інтенсивної перебудови та деградації полімерної структури й пов'язаний зі стрибкоподібним зниженням в'язкості та структурно-механічних властивостей.

3. Показано, що введення водорозчинних солей у склад біополімерних безглинистих розчинів підвищує межу їх термічної стабільності (зміщує поріг T_m у бік вищих температур), однак саме по собі не гарантує збереження достатнього рівня реологічних показників у термобаричних умовах свердловини. Це обґрунтовує необхідність додаткових технологічних рішень для стабілізації реології, зокрема коригування концентрацій полімерів і допоміжних реагентів та застосування спеціальних методів регулювання параметрів з урахуванням температурного режиму.

4. Проаналізовано вплив найбільш поширених у практиці буріння водорозчинних солей (хлоридів калію, натрію і кальцію, а також нітрату кальцію) на властивості біополімерної системи «Біокар» та визначено

раціональні межі їх застосування в термобаричних умовах свердловини. Для складу з хлоридом натрію встановлено мінімальну концентрацію 15%, за якої протягом тримісячного періоду спостережень не виявлено ознак ферментативного руйнування полімерної основи, що дозволяє зменшувати потребу у введенні спеціальних бактерицидних реагентів при збереженні прийнятної стабільності системи в часі.

наведені по вертикалі):

- верхній водоносний надсольовий мезокайнозойський комплекс (0–2000 м);
- сольовий інтервал, представлений девонською штоковою сіллю та нижньопермською карбонатно-галогенною товщею з продуктивними горизонтами.

Верхній інтервал складений ґрунтово-рослинним шаром, пісками, пухкими пісковиками, крейдово-мергельною товщею з прошарками вапняків, алевролітів і глин. Більшість порід цього інтервалу (за винятком глин та інших ущільнених різновидів) відзначаються підвищеною проникністю — до 5×10^{-15} м². За буримістю вони належать до групи м'яких, із прошарками порід середньої твердості.

Кайнозойські та сеноман-нижньокрейдіві водоносні горизонти містять питні води, тому під час буріння необхідно забезпечити їх надійний захист від можливого забруднення.

Розріз у верхньому інтервалі є нестійким, оскільки включає водоносні піски, пухкі пісковики та тріщинуваті вапняки з дуже низьким градієнтом тиску гідророзриву — 0,012–0,013 МПа/м, що зумовлює схильність до поглинань. У цьому інтервалі можливі звуження стовбура та утворення каверн.

Другий інтервал представлений флюїдостійкими сольовими відкладами, які характеризуються вищою міцністю. Для сульфатних і карбонатних порід градієнт тиску гідророзриву зростає до 0,016–0,018 МПа/м, а для сольових — до 0,022 МПа/м.

За буримістю породи другого інтервалу переважно належать до м'яких (сілі), однак містять пласти твердих порід і прошарки середньої твердості (глини). Попри підвищені міцнісні показники, інтервал залишається нестійким. Тут можливі викривлення стовбура, жолобоутворення, формування каверн через розмив кам'яної солі, а також утворення уступів на контактах шарів різної міцності.

Для розрахунку конструкції свердловини прийнято такі геохімічні характеристики: густина підземної води в пластових умовах зростає від 1000 кг/м³ у кайнозойських відкладах до 1160 кг/м³ у нижній частині розрізу. Відносна

густина газу за повітрям становить 0,62. Вміст CO₂ у газі — 0,15–0,59 %.

З огляду на гірничо-геологічні умови, накопичений досвід буріння, вимоги чинних норм щодо охорони питних вод, надр і довкілля, а також необхідність безпечного розкриття газових об'єктів, проєкту свердловину пропонується бурити за такою конструкцією (глибини наведені по вертикалі):

324–150 × 245–2000 × 168/140–4560.

Кондуктор Ø324 мм спускають у глинисту підшву палеогену (покрівлю крейди) на глибину 150 м для захисту горизонтів із питною водою від контакту з буровим розчином, запобігання поглинанням і обвалам водовміщуючих пісків та пісковиків.

Проміжну колону Ø245 мм спускають до покрівлі девонської штокової солі на 2000 м — для безпечного проходження сольового інтервалу з продуктивними горизонтами А-2а та А-2б і для ізоляції нестійких водоносних відкладів верхнього комплексу.

Експлуатаційну колону Ø168/140 мм опускають до проєктної глибини для закріплення продуктивної частини розрізу та проведення випробувань пошукових газових об'єктів; колона комплектується трубами підвищеної міцності з високогерметичними різьбовими з'єднаннями. Підйом цементного розчину передбачено по всіх колонах до гирла.

Башмаки обсадних колон встановлюють у щільних, міцних породах із градієнтом тиску гідророзриву не нижчим за 0,020–0,024 МПа/м.

Перед спуском обсадних колон виконують шаблонування стовбура із застосуванням компоновки низу бурильної колони, передбаченої проєктом. У разі посадки бурильної колони проводять проробку інтервалу з подальшим повторним шаблонуванням. Під час проробки забезпечують безперервну подачу долота і не допускають тривалої роботи на одному місці, щоб уникнути забурювання другого стовбура. Режим промивання має відповідати режиму під час буріння. Після досягнення вибою свердловину промивають для максимального видалення залишків вибуреної породи та вирівнювання параметрів бурового розчину по всій довжині стовбура; тривалість промивки — не менше двох циклів.

Кондуктор Ø324 мм спускають на 150 м. Низ колони оснащують башмаком

типу БК-324, зворотним клапаном тарільчатого типу Ø324 мм і кільцем стоп. Проміжну колону Ø245 мм спускають однією секцією на 2000 м. Низ колони комплектують башмаком типу БП-245 і двома зворотними клапанами типу ЦКОД-245-2. Експлуатаційну колону Ø140/168 мм спускають однією секцією на 4650 м. Перехід діаметра передбачено на глибині 1950 м. На 1900 м установлюють пристрій двоступеневого цементування ПДЦ-168. Низ колони обладнують башмаком типу БП-140 і двома зворотними клапанами типу ЦКОД-140-1.

Цементування експлуатаційної колони Ø140/168 мм виконують до гирла у два етапи. Перший ступінь цементування здійснюють в інтервалі 4650–1900 м тампонажним портландцементом для помірних температур ПЦТ І-100 ДСТУ Б В.2.7-88-99. Рідиною замішування є насичений розчин хлориду натрію густиною 1180 кг/м³. Густина тампонажного розчину — 1950 кг/м³. Другий ступінь у межах 1900–0 м цементують тим самим типом цементу з підняттям тампонажного розчину до устя; густина — 1850 кг/м³. Як буферну рідину перед тампонажним розчином першого й другого ступенів закачують 6 м³ рідини замішування відповідного ступеня. Для підвищення якості цементування та збереження колекторських властивостей продуктивних пластів при цементуванні експлуатаційної й проміжної колон до тампонажного розчину вводять реагенти-знижувачі водовіддачі ОЕЦ типу “Tylose E 29651”. Щоб отримати однорідний за густиною тампонажний розчин, застосовують усереднюючу ємність.

Контроль процесу цементування обсадних колон виконують із використанням станції контролю цементування (СКЦ).

3.4 Рекомендації щодо бурових розчинів

Для проходки під кондуктор діаметром 324 мм в інтервалі 0–150 м застосовують глинистий буровий розчин. До його складу входять структуроутворювач (бентонітова глина), мастильна добавка (графіт), реагент для зниження фільтрації (СМС-LV) та флокулянт New Drill PLUS. Під час розбурювання цементного стакана в систему додатково вводять кальциновану соду як реагент для зв'язування іонів кальцію.

- при бурінні інтервалу 0–150 м: $\rho = 1120$ кг/м³;
- при бурінні інтервалу 150–2000 м: $\rho = 1140$ кг/м³;
- при бурінні інтервалу 2000–4650 м: $\rho = 1280$ кг/м³.

Підбір обсадних труб за міцністю, виходячи з максимального тиску на усті в процесі буріння та випробувань.

Забезпечення герметизації устя відповідно до максимального розрахункового тиску. За розрахунками та згідно з ГОСТ 13862-90 на кондуктор і проміжні обсадні колони встановлюють таке противикидне обладнання (ОП):

- на кондуктор Ø324 мм — ОПЗ-350×21;
- на проміжну колону Ø245 мм — ОП5-230×35;
- на експлуатаційну колону Ø168×140 мм — ОПЗ-230×35.

Монтаж ОП виконують відповідно до вимог СОУ 11.2-30019775-142:2008 (вимоги до монтажу та експлуатації противикидного обладнання при бурінні) і СОУ 11.2-30019775-141:2008 (вимоги до монтажу та експлуатації колонних головок). Відхилення від затверджених схем і положень цих СОУ допускається лише у встановленому порядку.

Кондуктор і всі обсадні колони повинні бути оснащені колонною головкою типу ОКК2-35-168×245×324.

Як первинний дегазатор на превенторному відведенні передбачають установлення ємності або спеціального трапа заводського виготовлення, призначеного для цієї мети.

Для основної та заключної дегазації встановлюють дегазатор ДВС-II або ДУ-1.

Бурова установка повинна бути укомплектована приладом для безперервного доливу свердловини під час підймання бурильної колони, а також засобами механізації для оперативного обважнення й приготування розчину. На буровій мають бути два комплекти ЛГР-3 і два прилади ПГ-1 (ВГ-1) для контролю вмісту газу.

3.5 Висновки до розділу 3

– Під час циркуляції воду послідовно обробляють реагентом Біокар-компаунд, хлоридом калію та хлоридом натрію, доводячи систему до заданих параметрів.

– Для введення реагентів використовують механізовані засоби (гідравлічна воронка, ФСМ, глиномішалка та інше обладнання), що забезпечує інтенсивне диспергування й швидке змішування.

Під час розкриття проникних інтервалів до складу бурового розчину додатково вводять реагенти-кольматанти, зокрема карбонатний М-25 та органічний К-200, щоб обмежити проникнення твердих частинок і фільтрату в пласт і знизити ризики поглинань. Для стабілізації фільтраційних і реологічних властивостей також додають реагент Алеврон, а з метою запобігання біологічному руйнуванню полімерної основи вводять бактерицид (наприклад, Biostat або функціональний аналог). Після завершення приготування циркуляцію сформованої біополімерної системи виконують щонайменше у два повні цикли для вирівнювання складу та стабілізації параметрів у всьому об'ємі.

У процесі виготовлення розчину підтримують максимально можливу продуктивність бурових насосів, усі засоби очищення тимчасово відключають, щоб не втрачати активні реагенти й не зменшувати концентрацію твердих добавок, необхідних для кольматації. Потік у жолобній системі за можливості випрямляють, а також задіюють усі наявні засоби перемішування в приймальних резервуарах для запобігання зонуванню та нерівномірності параметрів. Після доведення системи до проєктних показників дозволяється перехід до подальшого поглиблення свердловини.

Заплановані режими та послідовність технологічних операцій загалом відповідають підходам, які застосовувалися під час розкриття продуктивних горизонтів Островерхівської площі, що пояснюється подібністю геолого-технологічних умов буріння та характером очікуваних ускладнень (рис. 4.3).

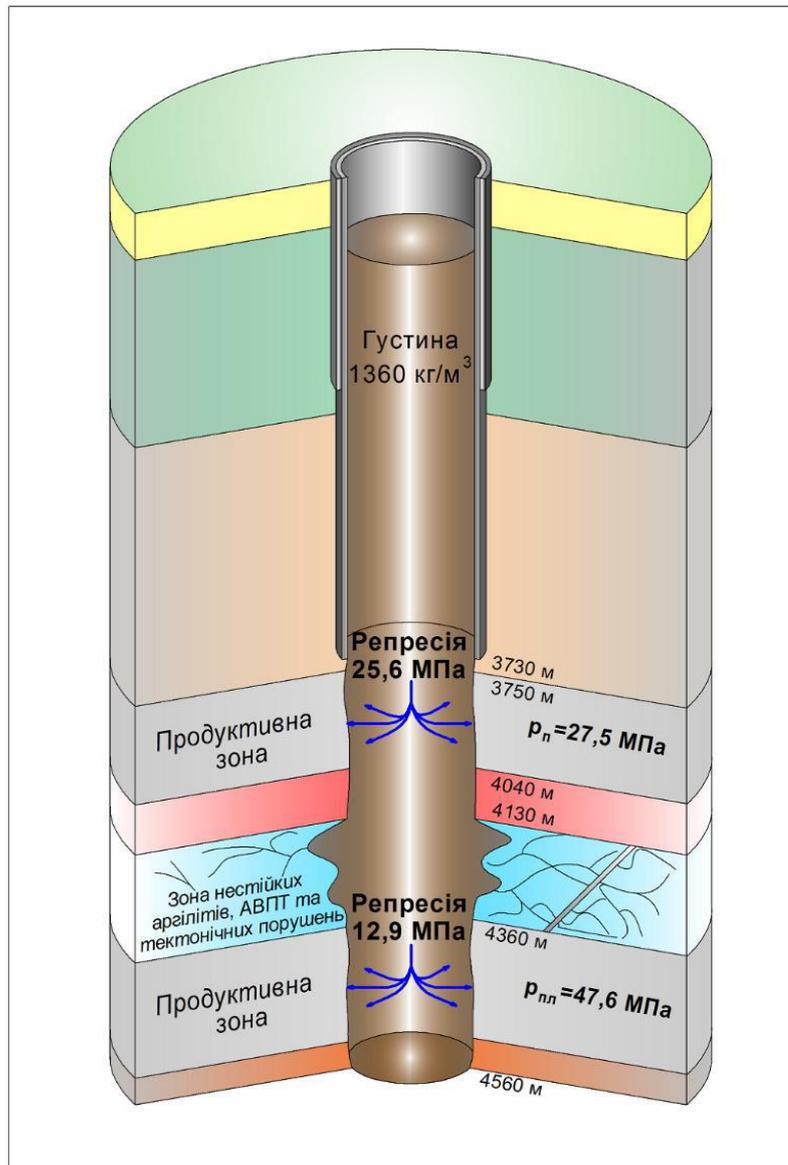


Рисунок 4.3 – Планова геолого-технічна ситуація при бурінні свердловини №105-Копилівська

Шлам порід, і насамперед його тонкодисперсна фракція, помітно впливає на технологічні характеристики безглинистих бурових розчинів, причому найбільше – на ті властивості, які формують їх переваги над традиційними полімерглинистими системами. Саме тому під час буріння значну увагу приділяють ефективному очищенню промивальної рідини від вибуреної породи. На свердловинах, де застосовують систему Біокар-МТ, як правило, монтують розгалужену та достатньо складну схему очищення. Вона передбачає встановлення щонайменше двох, а в окремих випадках трьох, лінійних вібросит із повним комплектом сіток різної крупності, сито-гідроциклонного блока та

6. З урахуванням лабораторних результатів і даних промислових випробувань на інших об'єктах показано, що застосування Біокар-МТ під час розкриття продуктивних пластів Б-8-9 у свердловині №105 Копилівського ГКР дає змогу зберегти їх фільтраційні характеристики. Водночас завдяки вираженим кольматуючим властивостям реагенту Алеврон знижується ризик забруднення пластів навіть за температур, близьких до критичних для полісахаридних полімерів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. БЮКАР – безглиниста промивальна рідина для буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин та розкриття продуктивних горизонтів / [Ю.В. Лубан, Я.В. Кунцяк, С.В. Лубан та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 4. – С. 18 – 21.
2. Богославець В.В. Вибір оптимальних рецептур бурових розчинів для розкриття нафтових пластів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.10 «Буріння свердловин» / В.В. Богославець. – Івано-Франківськ, 2014. – 19 с.
3. Буферна рідина для цементування обсадних колон / [Розенгафт А.Г., Лубан Ю.В., Харів І.Ю. та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 4. – С. 31, 32.
4. Бейзик О.С. Підвищення якості розкриття продуктивних горизонтів на родовищах Прикарпаття: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.06 «Розробка нафтових та газових родовищ» / О.С. Бейзик. – Івано-Франківськ, 2011. – 17 с.
5. Васильченко А.О. Методологія оцінки впливу окремих реагентів та їх сумішей на відновлення проникності порід-колекторів / А.О. Васильченко // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 4. – С. 18 – 19.
6. Васильченко А.О. Результати порівняльних випробувань зарубіжного та вітчизняного безглинистих біополімерних бурових розчинів / А.О. Васильченко // Нафтова і газова промисловість. – 2010. – № 5. – С. 16 – 18. До питання оцінки інгібіруючих властивостей промивальних рідин
7. Застосування безглинистих промивальних рідин в умовах високих пластових тисків і температур / [Ю.В. Лубан, С.В. Лубан, В.В. Дудзич та ін.] // Нафтогазова галузь України. – 2013. – № 2. – С. 18 – 22.
8. Іванків О.О. Розробка та впровадження рідин глушіння на основі крохмально-сольових гелів для капітального ремонту свердловин / О.О. Іванків, І.Г. Зезекало, В.П. Троцький // Нафта і газ України: матеріали 6-ої Міжнародної наук.-практ. конф. [«Нафта і газ України-2000»], (31 жовтня – 3 листопада): зб. наук. праць – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – Т. 2. – С. 259 – 260.

9. Розенгафт, Р.С. Яремійчук, І.Ю. Харів, С.В. Лубан] // Нафта і газ України: матеріали 6-ої Міжнародної наук.-практ. конф. [«Нафта і газ України – 2000»], (Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада): зб. наук. праць. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – Т. 2. – С. 91.
10. Карп І.М., Єгер Д.О. Зарубін Ю.О. та інш. Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України. - Київ: „Наукова думка”, 2006. - 309с.
11. Єгер Д.О. Упорядковане використання методів дії на привибійну зону пластів у процесах нафтогазовидобутку. - Київ: Техніка, 2003. - 162 с.
12. Меркур'єв А.Б., Рудий М.І., Цьомко В.В., Качмар Ю.Д. Нарощування ресурсної бази вуглеводнів шляхом кислотної дії на продуктивний пласт // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - 2007. - № 3(24). - С.9 -14.
13. Болоховська В.А., Рудий М.І. Використання вітчизняних біополімерів у процесах видобування нафти і газу // Збірник наукових праць наук.-практ. конф. „Стан і перспективи розробки родовищ нафти і газу України”, 18 - 21 листопада 2003 року. - Івано-Франківськ, 2003. - С.242 - 243.
14. Єгер Д.О. Підвищення ефективності направлених методів інтенсифікації видобутку нафти і газу. - Львів: Ліга-прес, 2003. - 160 с.
15. Єгер Д.О., Рибчич І.Й. Вплив стану фільтраційної характеристики привибійної зони багат шарових пластів на ефективність розробки нафтових і газових родовищ. - Львів: Ліга-прес, 2003.- 1 16 с.
16. СОУ 11.1-00135390-015:2005 Свердловини на нафту і газ. Кислотна обробка / Рудий М.І., Рудий С.М. - Введено 01.04.06. - Івано-Франківськ, 2006. - 254 с.
17. Рудий М.І., Вантух М.П., Костецький В.В., Барабаш В.В. Вивчення можливості застосування НТФК для оброблення продуктивних пластів // Науковий вісник ІФНТУНіГ. - 2007. - № 2 (16).-С. 57 -62.
18. Рудий М.І., Вантух М.П. Вдосконалення технології кислотної дії на пласт високотемпературних свердловин // Збірник наукових праць наук.-практ. конф. „Стан і перспективи розробки родовищ нафти і газу України”, 18 - 21 листопада 2003 року. - Івано-Франківськ, 2003. - С. 239-240.
19. Патент № 72332 Україна, МКВ Е21В 43/27. Спосіб кислотної обробки високотемпературних свердловин /ВАТ „Укрнафта”: Веклюк О.И.,

- Рудий М.І., Барабаш В.В. та інші. -№20021210386. - Заявл. 20.12.2002; Опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. Тосунов Э.М. Повышение качества вскрытия продуктивных пластов // Нефтяное хозяйство — 1990.- № 3. - С. 16-18.
20. Кондрата Р.М. Довідник з нафтогазової справи / За загальною редакцією докторів технічних наук Р.М.Кондрата, В.С.Бойка, Р.С.Яремійчука – К.:Львів, 1996 рік.
21. Кочмар Ю.Д. Интенсификация припливу нафтогазової продукції до свердловин/ Ю.Д. Кочмар; К.: Львів, 2005р. – ч.2 – 371с.
22. Горський В.Ф. Полегшений тампонажний цемент ПЦТП 22 – 100 / В.Ф. Горський, Ю.Ф. Шевчук, Д.О. Єгер та ін. // Нафтова і газова промисловість. - 1996. № 2.- С. 41 – 43.
23. Прогноз глибини і ступеня пошкодження привибійної зони пласта за даними технології його розкриття : матеріали 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції “Нафта і газ України / В.О. Федішин, М.І. Зозуляк, М.В. Рега - 2000”.- Т 2. -м. Івано-Франківськ. -С. 106 – 107.
24. Лубан Ю.В. Про вплив промивних рідин, інгібованих хлоридом магнію, на якість розкриття продуктивних горизонтів / Ю.В. Лубан // Нафтова і газова промисловість. - 1998. -№6. -С.21 –23.
25. Єгер Д.О. Досвід буріння свердловин з використанням доліт компанії “Х’юз Крістенсен” на родовищах ВАТ “Укрнафта” / Д.О. Єгер, М.Є. Тачинський, М.В. Каралаш, та ін. // Нафтова і газова промисловість – 1997.- № 6. - С. 20 – 26.
26. Черниш І.Г. Модифіковані волокнисті сорбенти нафтопродуктів на основі гірничо-збагачувального виробництва / І.Г. Черниш, С.В. Ільчишина, Д.О. Єгер, та ін.// Нафтова і газова промисловість. – 1996. - № 2. - С. 32 – 33.
27. Ільчишина С.В. Використання гідрофільно-гідрофобних сорбентів на основі мінеральних волокон та терморозширеного графіту для очищення підтоварної води / С.В. Ільчишина, І.Г. Черниш, М.Ф. Іванишин, Д.О. Єгер // Нафтова і газова промисловість. - 1997. - № 3. - С. 26 – 27.
28. Гошовський С.В. Проблема нарощування видобутку вуглеводнів в Україні / С.В. Гошовський // Нафтова і газова промисловість. – 1998. - №6. - С. 25-26.

29. Шевченко І.М. Розвиток концепції “низькопористий колектор” в контексті розгляду його фізико-хімічних властивостей / І.М. Шевченко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ. - 1999. - Вип. 36. - С. 208-213.
30. Дорошенко В.М. Фізико-хімічні основи використання солевого відсіву виробництва магнею для технологічних дій у свердловинах /В.М. Дорошенко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ. - 1994. - Вип. 31. - С. 68-71.
31. Шевченко І.М. Властивості граничного шару низькопористого колектора і його вплив на вибір методу інтенсифікації припливу / І.М. Шевченко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ. - 1997. - Вип. 34. - С. 203- 206.
32. Пат. 84206 Україна, МПК F04В 47/02 (2006.01). Глибинний штанговий насос [Текст] / Я.Д. Климишин, А.В. Угриновський, Н.С. Дячук, І.І. Штиглян; заявник і патентовласник Климишин Я.Д., Угриновський А.В., Дячук Н.С., Штиглян І.І. – №а2006 12161; заявл. 20.11.2006; опуб. 25.09.2008, Бюл. №18.
33. Пат. 84765 Україна, МПК (2006) В01F 11/00, Е21В 43/00. Диспергуючий пристрій [Текст] / А.В. Угриновський, Я.Д. Климишин, Н.С. Дячук, І.І. Штиглян; заявник і патентовласник Угриновський А.В., Климишин Я.Д., Дячук Н.С., Штиглян І.І. – №а200612931; заявл. 07.12.2006; опуб. 25.11.2008, Бюл. №22.
34. Угриновський А.В. Класифікація плунжерів та особливості їх вибору для установки плунжерного піднімача / А.В. Угриновський, Л.Б. Мороз, І.В. Криський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №4(41). – С. 13-20.
35. Пат. 20548А Україна, МКВ Е21В 43/27. Спосіб хімічної обробки пластів / Підприємство „Долина нафтогаз” ВАТ „Укрнафта”: Петриняк В.А., Рудий М.І., Касянчук В.Г. та інші. – № 96114237; заявл. 18.11.96; опубл. 15.07.97, Бюл. № 3.
36. Kalfayan, L. (2008) Production Enhancement with Acid Stimulation. 2nd edn. Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation.

37. McLeod, H. Q. (2007) 'Matrix Acidizing', in Lake, L. W. and Clegg, J. D. Petroleum Engineering Handbook: Production Operations Engineering. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, pp.275-321.
38. Microbial Formation Damage (2012) available at: http://www.corex.co.uk/microbial_formationdamage.php (Accessed: 05 March 2018)