

УДК 622.276
МРНТИ 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108862>

Получена: 21.04.2025.
Одобрена: 20.05.2025.
Опубликована: 30.06.2025.

Оригинальное исследование

Исследование сшитых полимерных составов на основе морской и альб-сеноманской воды для проектов по повышению нефтеотдачи пластов в условиях месторождения Узень

Ж.М. Алпысбай

Филиал КМГ Инжиниринг «КазНИПИМунайгаз», г. Актау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Закачка полимерных растворов является одной из наиболее распространённых технологий для увеличения добычи нефти, однако данные растворы могут подвергаться различным физико-химическим воздействиям, которые приводят к снижению их эффективности. В данной работе внимание уделяется сравнению прочности гелей, применяемых в проектах по повышению нефтеотдачи пластов в условиях месторождения Узень.

Цель. Сравнение прочностей гелей, приготовленных на основе морской и альб-сеноманской воды, с целью повышения эффективности проводимых работ.

Материалы и методы. В рамках экспериментов были использованы альб-сеноманская и морская вода, отобранные непосредственно с месторождения, что позволило максимально воспроизвести реальные полевые условия. Для сравнительного анализа дополнительно применялась дистиллированная вода. В качестве химических реагентов использовались составы, задействованные в действующих проектах по повышению нефтеотдачи пластов на исследуемом месторождении. Приготовление рабочих растворов осуществлялось с использованием высокоточного лабораторного оборудования в соответствии с методиками, регламентированными API (American Petroleum Institute – Американский нефтяной институт).

Результаты. Проведённые лабораторные исследования показали, что гелевые системы на основе альб-сеноманской воды характеризуются повышенной прочностью и термической стабильностью по сравнению с аналогами на морской воде.

Заключение. В рамках исследования изучено влияние минерализации воды на вязкость полимерного раствора, проведены эксперименты по оценке прочности гелей, приготовленных в различных условиях, и проанализированы факторы, влияющие на их прочность. Представленные результаты и предложенные рекомендации могут быть полезны для дальнейшего совершенствования методов повышения нефтеотдачи пластов и минимизации их негативного воздействия при использовании полимерных технологий.

Ключевые слова: выравнивание профиля приёмистости, полимер, вязкость, гелант, гель.

Как цитировать:

Алпысбай Ж.М. Исследование сшитых полимерных составов на основе морской и альб-сеноманской воды для проектов по повышению нефтеотдачи пластов в условиях месторождения Узень // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2025. Том 7, №2. С. 30–39.
DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108862>.

UDC 622.276

CSCSTI 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108862>

Received: 21.04.2025.

Accepted: 20.05.2025.

Published: 30.06.2025.

Original article

Crosslinked Polymer Gels in Marine and Alb-Cenomanian Waters for EOR Applications at the Uzen Field

Zhalgas M. Alpysbay

Branch of KMG Engineering “KazNIPImunaigaz”, Aktau, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: Polymer flooding is one of the most commonly used methods in enhanced oil recovery, but polymer solutions are exposed to various physico-chemical factors that can significantly reduce their performance. This study examines the comparative strength of crosslinked polymer gels applied in EOR operations at the Uzen field.

Aim: Comparison of polymer gel strength using marine and Alb-Cenomanian waters to support more effective EOR operations.

Materials and methods: The experiments used Alb-Cenomanian and marine waters collected directly from the Uzen field. This helped closely replicate real reservoir conditions. Distilled water was also used for comparison. The chemical reagents matched those currently applied in EOR projects at the same field. All working solutions were prepared using high-precision laboratory equipment, following procedures standardized by the American Petroleum Institute (API).

Results: Laboratory tests demonstrated that gel systems based on Alb-Cenomanian water exhibited greater strength and thermal stability compared to those prepared using marine water.

Conclusion: The study looked at how water salinity affects the viscosity of polymer solutions. It also included gel strength tests under different conditions and explored the factors influencing gel performance. The findings may help improve EOR methods and reduce the negative effects of polymer-based technologies.

Keywords: *conformance control; polymer; viscosity; gelant; gel.*

To cite this article:

Alpysbay ZM. Crosslinked Polymer Gels in Marine and Alb-Cenomanian Waters for EOR Applications at the Uzen Field. Kazakhstan journal for oil & gas industry. 2025;7(2):30–39.

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108862>.

ӨОЖ 622.276

FTAXP 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108862>

Қабылданды: 21.04.2025.

Мақұлданды: 20.05.2025.

Жарияланды: 30.06.2025.

Түпнұсқа зерттеу

Өзен кен орны жағдайында қабаттардың мұнай беруін арттыру жобалары үшін теңіз және альб-сеноман суының негізінде тігілген полимерлік құрамдарды зерттеу

Ж.М. Алпысбай

ҚМГ Инжиниринг «ҚазҒЗЖИмұнайгаз» филиалы, Ақтау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Полимерлі ерітінділерді айдау мұнай өндіруді арттырудың ең кең таралған технологияларының бірі болып табылады, алайда бұл ерітінділер олардың тиімділігінің төмендеуіне әкелетін әр түрлі физикалық-химиялық әсерлерге ұшырауы мүмкін. Аталған жұмыста Өзен кен орны жағдайында қабаттардың мұнай беруін арттыру жобаларында қолданылатын гельдердің беріктігін салыстыруға назар аударылады.

Мақсаты. Жүргізілетін жұмыстардың тиімділігін арттыру мақсатында теңіз және альб-сеноман суының негізінде дайындалған гельдердің беріктігін салыстыру.

Материалдар мен әдістер. Тәжірибелер аясында кен орнынан тікелей іріктелген альб-сеноман және теңіз суы пайдаланылды, бұл нақты далалық жағдайларды барынша көбейтуге мүмкіндік берді. Салыстырмалы талдау үшін тазартылған су қосымша қолданылды. Химиялық реагенттер ретінде зерттелетін кен орнында қабаттардың мұнай беруін арттыру бойынша қолданыстағы жобаларға қатысатын құрамдар пайдаланылды. Жұмыс ерітінділерін дайындау API (American Petroleum Institute – Американдық мұнай институты) реттейтін әдістерге сәйкес жоғары дәлдіктегі зертханалық жабдықты қолдану арқылы жүзеге асырылды.

Нәтижелері. Жүргізілген зертханалық зерттеулер альб-сеноман суына негізделген гельдік жүйелер теңіз суындағы аналогтармен салыстырғанда беріктігі мен термиялық тұрақтылығының жоғары екендігімен сипатталатынын көрсетті.

Қорытынды. Зерттеу барысында судың минералдануының полимерлі ерітіндінің тұтқырлығына әсері зерттелді, әр түрлі жағдайларда дайындалған гельдердің беріктігін бағалау бойынша эксперименттер жүргізілді және олардың беріктігіне әсер ететін факторлар талданды. Ұсынылған нәтижелер мен берілген ұсыныстар полимерлі технологияларды пайдалану кезінде қабаттардың мұнай беруін арттыру және олардың теріс әсерін азайту әдістерін одан әрі жетілдіру үшін пайдалы болуы мүмкін.

Негізгі сөздер: қабылдау профилін тегістеу, полимер, тұтқырлық, гелант, гель.

Дәйексөз келтіру үшін:

Алпысбай Ж.М. Өзен кен орны жағдайында қабаттардың мұнай беруін арттыру жобалары үшін теңіз және альб-сеноман суының негізінде тігілген полимерлік құрамдарды зерттеу // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2025. 7 том, №2. 30–39 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108862>.

Введение

Пласты-коллекторы месторождения Узень сильно слоистые, с тонкими непроницаемыми глинами и аргиллитами, что является причиной высокого контраста проницаемостей. Наличие многочисленных речных палеорусел и пойменных отложений вызывает высокую неоднородность пластов, за счёт чего происходит избирательное продвижение закачиваемой воды по наиболее проницаемым пропласткам. В связи с этим для месторождения Узень актуальны вопросы повышения эффективности традиционного заводнения.

Задача неравномерности выработки пластов при наличии сложных геолого-физических условий успешно решается с помощью широкомасштабного применения технологий выравнивания профиля приемистости (далее – ВПП), основанных на воздействии на пласт гелеобразующими полимерными составами. Эти составы способны проникать вглубь высокопроницаемых зон на значительные расстояния и эффективно регулировать распределение потоков. Основное назначение закачки полимерных композиций заключается в выравнивании неоднородности продуктивных пластов за счёт снижения подвижности вытесняющего агента в высокопроводящих пропластках и повышения охвата пласта заводнением как по мощности, так и по простиранию.

Работы по изоляции высокопроводящих пропластков на месторождении Узень выполняются с 70-х гг. XX в., однако новейшая история начинается с 2018 г., когда были проведены опытно-промышленные испытания (далее – ОПИ) по подбору химических реагентов для технологий ВПП, которые используются по сей день. В период проведения ОПИ и далее при полевых обработках растворение полимера осуществляется на морской воде, т.к. она содержит меньше механических примесей по сравнению со сточными водами. Однако с 2023 г. в связи с активным переводом поддержания пластового давления на альб-сеноманскую воду на ряде участков месторождения Узень и благодаря её уникальному составу возник интерес к исследованию свойств сшитых полимерных систем, приготовленных на этой воде, с последующим сравнением со стандартными гелями, полученными на морской воде. Такие сравнительные исследования для условий месторождения Узень ранее не проводились, что подчёркивает оригинальность данной работы.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что с 2018 г. технологический дизайн ВПП на месторождении Узень оставался неизменным. При этом наблюдается высокая частота повторных обработок, т.к. ежегодно обрабатывается около одной трети фонда нагнетательных скважин. Месторождение Узень относится к катего-

рии зрелых, и с каждым годом фиксируется рост обводнённости пластов, что требует разработки более эффективных подходов для стабилизации процесса добычи. В связи с этим возникает необходимость оптимизации существующих технологий и методов закачки реагентов с целью повышения их эффективности в условиях возрастающей обводнённости и зрелости месторождения.

В данной работе сделан акцент на исследовании гелей, приготовленных на различных типах вод месторождения Узень, оценке их прочности и стабильности в условиях пластовых температур и объяснении соответствующих физико-химических процессов. Дополнительно проводится сравнение вязкости полимерных растворов до их сшивания.

Представленные результаты и рекомендации могут быть полезны для дальнейшего совершенствования методов повышения нефтеотдачи пластов на месторождении, что подчёркивает теоретическую и практическую значимость данной работы.

Материалы и методы

При проведении исследования были поставлены следующие задачи:

- 1) приготовить полимерные растворы на основе альб-сеноманской, морской и дистиллированной воды с последующим замером вязкости;
- 2) приготовить гелант (раствор полимера до гелеобразования) с последующей выдержкой в термощафе при пластовой температуре месторождения Узень;
- 3) сравнить прочность образовавшихся гелей и оценить их деградацию после выдержки в термощафе согласно установленным временным диапазонам;
- 4) провести анализ воды на наличие микроорганизмов, выделившихся при синерезисе гелей.

В ходе экспериментов использовались альб-сеноманская и морская вода с месторождения для воссоздания реальных полевых условий. Для сравнения дополнительно использовалась дистиллированная вода. Компонентный состав используемых вод был взят из данных Центра научных лабораторных исследований (табл. 1).

В работе использован полимер марки FP-307 и сшиватель ацетат хрома, используемые на текущий момент на месторождении Узень в технологии ВПП. Физико-химические показатели полимера представлены в табл. 2.

Полимер FP-307 относится к среднецееновому сегменту ПАА-реагентов. Стоимость материала составляет 2,5–5 долл. США/кг (по данным на 2024 г. [1]), что делает его экономически целесообразным для масштабного применения на месторождении.

Таблица 1. Химический состав
используемых вод
Table 1. Chemical composition of the waters used

Наименование Parameter	Результаты Results	
	Морская Marine water	Альб-сеноманская Alb-Cenomanian water
pH	7,9	7,6
Плотность при 20°C, г/см³ Density at 20°C, g/cm³	1,007	1,006
Общая минерализация, мг/дм³ Total salinity, mg/dm³	12540	9389
Общая жёсткость, мг-экв/дм³ Total hardness, mg-eq/dm³	110	35
Тип воды по Сулину¹ Water type (by Sulina)	Cl-Mg	SO₄ – Na
Химический состав, мг/дм³: Chemical composition, mg/dm³:		
Na⁺+K⁺	2493	2679
Ca²⁺	400,8	501,0
Mg²⁺	1094,4	121,6
Cl⁻	5615,3	3757,7
HCO₃⁻	256,2	244,0
CO₃²⁻	не обнаружено not detected	не обнаружено not detected
SO₄²⁻	2680,3	2085,6
мех. примеси mechanical impurities	1,5	-

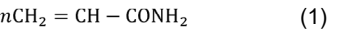
Таблица 2. Физико-химические показатели
ПАА марки FP-307
Table 2. Physicochemical properties
of FP-307 PAM

Показатель Property	Ед. изм. Unit	Результат Result
Форма Form	-	гранулированное твёрдое вещество granular solid
Цвет Color	-	белый с лёгким желтоватым оттенком white with a slight yellowish tint
Молекулярный вес Molecular weight	×10⁶, Дальтон ×10⁶, Dalton	6,2
Объёмная плотность Bulk density	г/см³ g/cm³	0,67
Характеристическая вязкость Intrinsic viscosity	дл/г dL/g	11,5
Время растворения в деионизированной воде при 5 мг/л и 25°C Dissolution time in deionized water (5 mg/L at 25 °C)	мин min	120
Степень гидролиза Degree of hydrolysis	%	7,4
Содержание основного вещества Active ingredient content	%	90
Содержание нерастворимого остатка Insoluble residue content	%	0,3

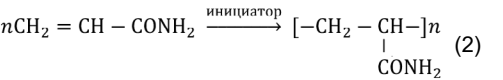
ПАА / PAM – полиакриламид / polyacrylamide

Полимер FP-307 представляет собой анионный ПАА, полученный путём полимеризации мономера акриламида (C₃H₅NO). Молекулярная масса FP-307 составляет 6,2 млн дальтонов. В полимерной цепи могут быть внедрены анионные группы, такие как карбоксильные (-COO⁻), что придаёт материалу дополнительные флокулянтные свойства.

Химическая формула мономера акриламида следующая (1):



Уравнение полимеризации (2):



где n – количество мономерных звеньев в цепи. Для FP-307 это – около 87 000 мономеров.

Выбор данного полимера обоснован его широким применением на других месторождениях Мангистауской области в технологии ВПП, что делает результаты работы актуальными для аналогичных условий.

Исследования выполнены с использованием таких приборов, как вискозиметр, высокоточные весы, магнитные мешалки, в соответствии с международными стандартами, в частности, с практическими рекомендациями по оценке полимеров, применяемых в проектах по повышению нефтеотдачи пластов Американского нефтяного института (API – American Petroleum Institute) [2].

Хронология работ

Приготовление растворов. Первый этап исследований состоял в приготовлении растворов полимера на альб-сеноманской, морской и дистиллированной воде.

Раствор приготовлен согласно методике API [2]. Для этого путём пересыпания сухого полимера на край мешалки был подготовлен полимерный раствор. Раствор полимера был приготовлен при концентрации 5000 ppm, соответствующей основному режиму закачки, промышленно применяемому на месторождении Узень (3). Время растворения составляет 2 ч.

$$M_{\text{ПАА}} = \frac{10^{-4} \times M_{\text{воды}} \times C_{\text{ПАА}}}{A_{\text{ПАА}}} \tag{3}$$

где 10⁻⁴ г/мл – коэффициент, который переводит единицы из ppm (англ. parts per million – частей на миллион) в граммы на миллилитр воды. 1 ppm = 10⁻⁴ г/мл;

¹ Классификация вод по Сулину основана на преобладающих ионах и позволяет определить генетический тип воды: морской, континентальный или переходный.

$M_{\text{ПАА}}$ – масса полимера, необходимая для получения раствора заданной концентрации, г;
 $M_{\text{воды}}$ – масса воды, который используется для растворения вещества, мл;
 $C_{\text{ПАА}}$ – концентрация ПАА в воде, ppm;
 $A_{\text{ПАА}}$ – процентное содержание активной части полимера, %.

Результат расчёта по формуле (3) показал, что $M_{\text{ПАА}} = 1,388$ г ПАА на 250 мл воды. Активная часть полимера составляет 90%.

Замер вязкости. С целью определения вязкости раствора полимера, приготовленного в разных водах, произведён сравнительный замер вязкости. Замеры выполнены на вискозиметре BROOKFIELD AMETEK DV2T MultiDrive.

Шпindel – это вращающийся элемент вискозиметра, который погружается в жидкость для измерения её вязкости. В процессе вращения шпинделя создаётся сопротивление движению, которое и служит основой для расчёта вязкости. Вискозиметр измеряет силу, необходимую для вращения шпинделя в жидкости, и по этим данным определяет вязкость. Различные шпиндели могут применяться для разных типов жидкостей в зависимости от их плотности и вязкости (рис. 1).

При замерах вязкости растворов полимера на морской и альб-сеноманской воде использовался шпindel №61, а для измерений

на дистиллированной воде применялся шпindel №62 (табл. 3, рис. 2–4).

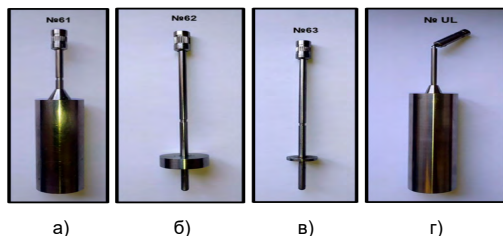


Рисунок 1. Типы шпинделей
Figure 1. Types of spindles

а) №61; б) №62; в) №63; г) №UL

Диапазон измерения вязкостей шпинделей: №61 – 100–1000 сП; №62 – 500–5000 сП; №63 – 2000–20000 сП; №UL – 10–100 сП

Viscosity measurement range (cP): No. 61 – 100–1000; No. 62 – 500–5000; No. 63 – 2000–20000; No. UL – 10–100.

Таблица 3. Результаты замеров вязкости
Table 3. Viscosity measurement results

Тип воды Water type	Вязкость, сП Viscosity, sP			
	замер №1 measurement No. 1	замер №2 measurement No. 2	замер №3 measurement No. 3	среднее average
Альб-сеноманская Alb-Cenomanian	774,6	764,4	760,8	766,6
Морская Marine	648,8	656,2	646,7	650,6
Дистиллированная Distilled	2089,0	2076,0	2064,0	2076,3

Step Averaging				Step Averaging				Step Averaging			
Unsaved Data				Unsaved Data				Unsaved Data			
Step 1 of 1				Step 1 of 1				Step 1 of 1			
Viscosity	774.6 cP	Torque	77.5 %	Viscosity	764.4 cP	Torque	76.4 %	Viscosity	760.8 cP	Torque	76.1 %
Std. Dev.	9.35 cP	Std. Dev.	0.9 %	Std. Dev.	17.81 cP	Std. Dev.	1.8 %	Std. Dev.	20.22 cP	Std. Dev.	2.0 %
Shear Stress	---	Temperature	29.0 °C	Shear Stress	---	Temperature	28.9 °C	Shear Stress	---	Temperature	28.9 °C
Std. Dev.	---	Std. Dev.	0.0 °C	Std. Dev.	---	Std. Dev.	0.0 °C	Std. Dev.	---	Std. Dev.	0.0 °C
Shear Rate	---	Density	1.070 g/cm³	Shear Rate	---	Density	1.070 g/cm³	Shear Rate	---	Density	1.070 g/cm³
Speed	6.0 RPM	Accuracy	10.00 cP	Speed	6.0 RPM	Accuracy	10.00 cP	Speed	6.0 RPM	Accuracy	10.00 cP

а)

б)

в)

Рисунок 2. Результаты замера вязкости полимерного раствора на альб-сеноманской воде
Figure 2. Viscosity test results for polymer solution based on Alb-Cenomanian water

а) замер №1 / measurement No. 1; б) замер №2 / measurement No. 2; в) замер №3 / measurement No. 3

Step Averaging				Step Averaging				Step Averaging			
Unsaved Data				Unsaved Data				Unsaved Data			
Step 1 of 1				Step 1 of 1				Step 1 of 1			
Viscosity	648.8 cP	Torque	64.9 %	Viscosity	656.2 cP	Torque	65.6 %	Viscosity	646.7 cP	Torque	64.7 %
Std. Dev.	12.75 cP	Std. Dev.	1.3 %	Std. Dev.	11.43 cP	Std. Dev.	1.1 %	Std. Dev.	11.41 cP	Std. Dev.	1.1 %
Shear Stress	---	Temperature	28.6 °C	Shear Stress	---	Temperature	28.6 °C	Shear Stress	---	Temperature	28.6 °C
Std. Dev.	---	Std. Dev.	0.0 °C	Std. Dev.	---	Std. Dev.	0.0 °C	Std. Dev.	---	Std. Dev.	0.0 °C
Shear Rate	---	Density	1.070 g/cm³	Shear Rate	---	Density	1.070 g/cm³	Shear Rate	---	Density	1.070 g/cm³
Speed	6.0 RPM	Accuracy	10.00 cP	Speed	6.0 RPM	Accuracy	10.00 cP	Speed	6.0 RPM	Accuracy	10.00 cP

а)

б)

в)

Рисунок 3. Результаты замера вязкости полимерного раствора на морской воде
Figure 3. Viscosity test results for polymer solution based on marine water

а) замер №1 / measurement No. 1; б) замер №2 / measurement No. 2; в) замер №3 / measurement No. 3

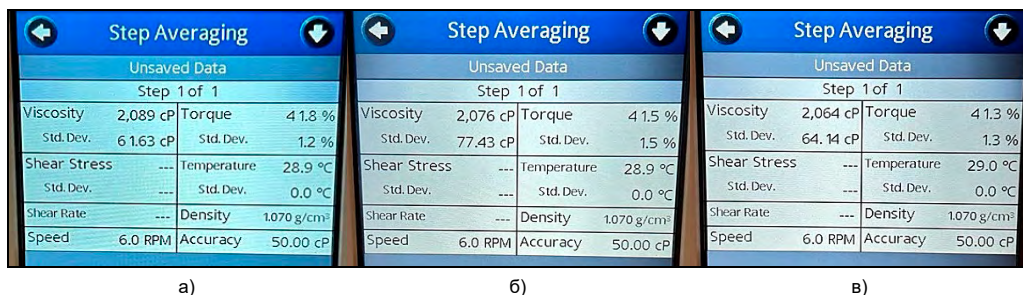


Рисунок 4. Результаты замера вязкости полимерного раствора на дистиллированной воде
Figure 4. Viscosity test results for polymer solution based on distilled water

a) замер №1 / measurement No. 1; б) замер №2 / measurement No. 2; в) замер №3 / measurement No. 3

Вязкость полимерного раствора значительно зависит от минерализации воды, что подтверждается результатами проведённых замеров. В ходе экспериментов было установлено, что при увеличении минерализации воды вязкость полимерного раствора снижается. Это связано с тем, что ионы, присутствующие в солёной и/или минерализованной воде, взаимодействуют с полимерными цепями, вызывая их укорочение и свёртывание. В результате полимер теряет способность образовывать плотную и вязкую структуру. Например, растворы, приготовленные на основе морской и альб-сеноманской воды, показали заметное уменьшение вязкости по сравнению с раствором на дистиллированной воде. Это обусловлено содержанием солей в природной воде, которые влияют на реологические свойства полимеров. Эти данные подтверждают, что для сохранения оптимальных характеристик полимерного раствора необходимо учитывать уровень минерализации используемой воды и корректировать состав полимерной системы соответственно.

Приготовление геланта. В готовый раствор полимера с целью дальнейшей сшивки был добавлен агент – ацетат хрома (далее – АХ) – при концентрации 500 ppm, соответствующей основному режиму закладки, промышленно применяемому на месторождении Узень (4):

$$M_{AX} = \frac{10^{-4} \times M_{\text{воды}} \times C_{AX}}{A_{AX}} \quad (4)$$

где $M_{\text{АХ}}$ – масса ацетата хрома (сшиватель), необходимая для дозирования, г;

C_{AX} – концентрация ацетата хрома в воде, ppm;

A_{AX} – процентное содержание активной части ацетата хрома, %.

Результат расчёта по формуле (4) показал, что $M_{AX} = 0,25$ г AX на 250 мл воды. Активная часть ацетата хрома составляет 49%.

Время гелеобразования является наиболее важным фактором гелевой системы. Для его определения использовался метод тестирования в бутылке как наиболее удобный и доступный [3]. Время гелеобразования определяется как время,

необходимое для достижения гелем максимальной прочности, варьирующейся от А до J (рис. 5) [4].

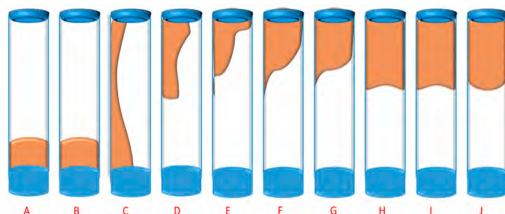


Рисунок 5. Метод определения прочности геля [3]

Figure 5. Gel strength determination method [3]

A – гель не образовался / *no detectable gel*; B – очень текучий гель / *highly flowing gel*; C – текучий гель / *flowing gel*; D – умеренно текучий гель / *moderately flowing gel*; E – слаботекучий гель / *barely flowing gel*; F – сильно деформируемый, нетекучий гель / *highly deformable nonflowing gel*; G – умеренно деформируемый, нетекучий гель / *moderately deformable nonflowing gel*; H – слабо деформируемый, нетекучий гель / *barely deformable nonflowing gel*; I – жёсткий гель / *rigid gel*; J – звонкий гель / *ringing gel*

Пробы геланта объёмом 40 мл были разлиты по ёмкостям для сравнения степени гелеобразования в зависимости от времени выдержки в термощафу при температуре 68°C (пластовая температура месторождения Узень) (рис. 6).

AGS4 и MGS4 демонстрируют одинаковую степень прочности через 4 ч в термощафу. В пробе DGS4 гелеобразование не наблюдается. Для дальнейшей оценки гелеобразования пробы были дополнительно выдержаны в термощафу, увеличив суммарное время выдержки до 12 ч. После дополнительной выдержки наиболее прочный гель образовался в пробе MGS12, тогда как в пробе AGS12 гель оказался более текучим. В пробе DGS12 гелеобразование по-прежнему отсутствует и относится к категории В (рис. 7).

A7 и M7 демонстрируют одинаковую степень прочности через 7 сут. В пробе D7 гелеобразование отсутствует (рис. 8).

А14 и М14 демонстрируют одинаковую степень прочности через 14 сут. В пробе D14 гелеобразование отсутствует (рис. 9).



Рисунок 6. Пробы геланта до размещения в термошкафу
Figure 6. Gelant samples before placement in the thermostatic chamber

A – раствор на альб-сеноманской воде; M – раствор на морской воде; D – раствор на дистиллированной воде.

Числа 7, 14 и 21 обозначают количество дней нахождения в термошкафу.

AGS4, MGS4 и DGS4 – растворы полимера на альб-сеноманской, морской и дистиллированной водах соответственно. Оценка гелеобразования – через 4 ч.

A – solution prepared with Alb-Cenomanian water; M – solution prepared with marine water; D – solution prepared with distilled water. The numbers 7, 14, and 21 indicate the number of days in the thermostatic chamber. AGS4, MGS4, and DGS4 – polymer solutions based on Alb-Cenomanian, marine, and distilled waters, respectively. Gelation was assessed after 4 hours.

Спустя 21 сут проба A21 характеризуется стабильной прочностью геля категории С, тогда как в пробе M21 наблюдается снижение прочности до категории В. В пробе D21 изменений нет – гелеобразование отсутствует (рис. 10). Синерезис отсутствует.

Экспериментально установлено, что после 21 сут наблюдений прочность геля на основе альб-сеноманской воды (A21) оказалась более стабильной, чем на основе морской воды (M21). Проба на альб-сеноманской воде сохранила прочность геля категории С, тогда как проба на морской воде снизилась до категории В спустя 21 сут в термошкафу при температуре 68°C.

В ходе эксперимента предполагалось, что в процессе хранения гелей может произойти синерезис – выделение воды из гелевой структуры.



Рисунок 7. Пробы геля после 4 и 12 ч
Figure 7. Gel samples after 4 and 12 hours

AGS12, MGS12 и DGS12 – растворы полимера на альб-сеноманской, морской и дистиллированной водах соответственно. Оценка гелеобразования – через 12 ч.

AGS12, MGS12 and DGS12 – polymer solutions based on Alb-Cenomanian, marine and distilled waters, respectively. Gelation assessment – after 12 h.

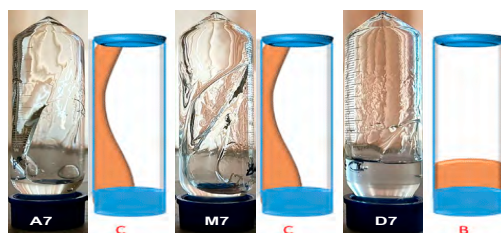


Рисунок 8. Пробы геля после 7 сут
Figure 8. Gel samples after 7 days



Рисунок 9. Пробы геля после 14 сут
Figure 9. Gel samples after 14 days

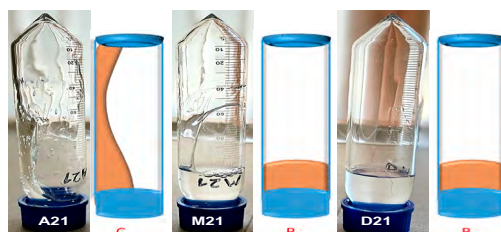


Рисунок 10. Пробы геля после 21 сут
Figure 10. Gel samples after 21 days

В рамках исследования планировалось провести анализ выделившейся воды на микроорганизмы для оценки их влияния на стабильность и деградацию гелей. Изучение содержания микроорганизмов в выделившейся воде позволило бы определить степень активности микробиологической деградации гелевых систем и влияние биологических факторов на их долговременную прочность. Однако возможно, что времени для выделения воды оказалось недостаточно, поскольку общее время выдержки составило всего 21 сут.

Результаты и обсуждение

В работе экспериментально доказано, что гели на основе альб-сеноманской воды за анализируемый период демонстрируют более высокую прочность и стабильность по сравнению с гелями на морской воде. Для полноты научного обоснования этих результатов детально раскрыты механизмы, лежащие в основе наблюдаемых различий:

1. Влияние минерализации и ионного состава воды. Ключевым фактором является разница в химическом составе вод:

а) морская вода имеет высокую минерализацию (12540 мг/дм^3) и содержит значительное количество ионов Mg^{2+} и Cl^- , которые способствуют более агрессивному воздействию на полимерные цепи. Высокая ионная сила среды ускоряет деградацию геля за счёт:

- компрессии двойного электрического слоя вокруг полимерных цепей, что снижает их гидродинамический объем и способность к сшиванию;

- образования нестабильных поперечных связей с ионами Mg^{2+} , которые со временем разрушаются более интенсивно при пластовой температуре месторождения (68°C) [5, 6];

б) альб-сеноманская вода обладает меньшей минерализацией (9389 мг/дм^3) и иным ионным профилем (преобладают Na^+ и SO_4^{2-}). Это обеспечивает:

- более стабильные ионные мостики между полимерными цепями, т.к. ионы Na^+ менее склонны к вытеснению при нагреве;

- меньшую конкуренцию за активные центры сшивателя (ацетата хрома), что улучшает равномерность поперечных связей.

2. Роль pH и буферных свойств. Реакция между полимером FP-307 и ацетатом хрома Cr^{3+} крайне чувствительна к уровню pH среды, достигая оптимальной эффективности в слабокислом или нейтральном диапазоне (pH 6–8). Хотя альб-сеноманская вода содержит меньше сульфатов ($2085,6 \text{ мг/дм}^3$) и бикарбонатов (244 мг/дм^3) по сравнению с морской водой ($2680,3 \text{ мг/дм}^3 \text{ SO}_4^{2-}$ и $256,2 \text{ мг/дм}^3 \text{ HCO}_3^-$), она демонстрирует лучшие буферные свойства (способность водной среды противостоять изменениям кислотно-

щелочного баланса при добавлении реагентов или под воздействием температуры) благодаря особенностям своего ионного состава.

Ключевое преимущество альб-сеноманской воды заключается в более сбалансированном соотношении ионов. Несмотря на меньшее абсолютное содержание буферных компонентов, их действие не подавляется высокими концентрациями хлоридов ($3757,7 \text{ мг/дм}^3$ против $5615,3 \text{ мг/дм}^3$ в морской воде). Кроме того, существенно меньшие общая минерализация (9389 мг/дм^3 против 12540 мг/дм^3) и жёсткость (35 против 110 мг-экв/дм³) создают более благоприятные условия для стабилизации pH.

Бикарбонатный буфер ($\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$) в сочетании с сульфатами обеспечивает эффективную нейтрализацию кислотных и щелочных компонентов. При этом отсутствие избытка хлоридов позволяет этой системе работать более эффективно, предотвращая резкие колебания pH при нагреве до пластовой температуры 68°C . Это создаёт оптимальные условия для протекания реакции поперечного сшивания полимерных цепей.

Морская вода, несмотря на большее содержание сульфатов и бикарбонатов, обладает пониженной буферной ёмкостью из-за доминирования хлоридов и высокой общей минерализации. Это делает её более уязвимой к изменениям кислотно-щелочного баланса при термическом воздействии. Смещение pH в кислую область приводит к переходу ионов хрома в неактивную форму $\text{Cr}(\text{OH})_3$, а в щелочной среде происходит гидролиз полимера FP-307 – оба процесса ухудшают качество геля.

Таким образом, именно комплексный ионный состав и умеренная минерализация, а не абсолютное содержание отдельных компонентов объясняют, почему альб-сеноманская вода обеспечивает более стабильные условия для гелеобразования. Это подтверждается экспериментальными данными, показывающими лучшую сохранность прочности гелей на основе альб-сеноманской воды после 21 сут выдержки при пластовой температуре.

Заключение

Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования технологий выравнивания профиля приемистости на месторождении Узень. Установленные закономерности подтверждают необходимость пересмотра действующих подходов к подготовке гелевых систем с целью повышения их технологической эффективности. Таким образом, данная работа не только углубляет понимание процессов гелеобразования в различных водных средах, но и формирует прикладные решения для оптимизации методов повышения нефтеотдачи на зрелых месторождениях.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований можно выделить изучение долгосрочной стабильности гелевых систем (свыше 21 сут), что позволит более полно оценить их применимость в условиях продолжительного воздействия на пласт.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. Author declares that he has no competing interests.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. IMARC Group. Polyacrylamide Pricing Report: Industry Trends, Price Analysis, Forecast 2024–2029 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.imarcgroup.com/polyacrylamide-pricing-report/toc>.
2. American Petroleum Institute. Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations. API recommended practice 63 (RP 63). Washington : API, 1990. 86 p.
3. Vargas-Vasquez S.M., Romero-Zerón L.B., Macgregor R., Gopalakrishnan S. Monitoring the crosslinking of a HPAM/Cr (III) acetate polymer gel using ¹H NMR, UV spectrophotometry, bottle testing, and rheology // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2007. Vol. 12, N 5. P. 339–357.
4. Sydansk R. A New Conformance-Improvement-Treatment Chromium (III) Gel Technology // SPE enhanced oil recovery symposium; 17–20 April, 1998; Tulsa, Oklahoma. Available from: <https://onepetro.org/SPEIOR/proceedings-abstract/88EOR/AII-88EOR/SPE-17329-MS/68250>.
5. Stevens M.P. Polymer Chemistry: An Introduction. New York : Oxford University Press, 1999. 571 p.
6. Flory P.J. Principles of Polymer Chemistry. New York : Cornell University Press, 1954. 687 p.

REFERENCES

1. IMARC Group. (2024). Polyacrylamide Pricing Report: Industry Trends, Price Analysis, Forecast 2024–2029 [Online]. Available at: <https://www.imarcgroup.com/polyacrylamide-pricing-report/toc>.
2. American Petroleum Institute. *Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations*. API recommended practice 63 (RP 63). Washington: API; 1990. 86 p.
3. Vargas-Vasquez SM, Romero-Zerón LB, Macgregor R, Gopalakrishnan S. Monitoring the crosslinking of a HPAM/Cr (III) acetate polymer gel using ¹H NMR, UV spectrophotometry, bottle testing, and rheology. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2007;12(5):339–357.
4. Sydansk R. A New Conformance-Improvement-Treatment Chromium (III) Gel Technology. SPE enhanced oil recovery symposium; 1998 Apr 17–20; Tulsa, Oklahoma. Available from: <https://onepetro.org/SPEIOR/proceedings-abstract/88EOR/AII-88EOR/SPE-17329-MS/68250>.
5. Stevens MP. *Polymer Chemistry: An Introduction*. New York: Oxford University Press; 1999. 571 p.
6. Flory PJ. *Principles of Polymer Chemistry*. New York: Cornell University Press; 1954. 687 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алпысбай Жалгас Максатұлы
ORCID 0009-0001-6942-8799
e-mail: m.alpysbay@kmge.kz.

AUTHOR'S INFO

Zhalgas M. Alpysbay
ORCID 0009-0001-6942-8799
e-mail: m.alpysbay@kmge.kz.