

УДК 54.084
МРНТИ 31.25.15

DOI: [10.54859/kjogi108873](https://doi.org/10.54859/kjogi108873)

Получена: 16.05.2025.

Одобрена: 23.07.2025.

Опубликована: 30.09.2025.

Оригинальное исследование

Исследование процесса сшиваемости полимерных материалов для повышения эффективности водоизоляционных составов

С.Е. Абдыкалыков, В.В. Сабалдаш

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

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время значительная часть нефтяных месторождений Казахстана находится на поздней стадии разработки, что сопровождается устойчивым снижением дебитов нефти и прогрессирующим ростом обводнённости продукции. Эти процессы существенно ухудшают эффективность эксплуатации пластов и усложняют управление системой вытеснения углеводородов. В сложившихся условиях особую актуальность приобретают технологии, направленные на ограничение и изоляцию водопритоков, как ключевой элемент повышения эффективности разработки месторождений. Одним из перспективных направлений в данной области является применение гелеполимерных систем, обладающих способностью селективно блокировать высокопроницаемые водонасыщенные зоны и перераспределять фильтрационные потоки в сторону нефтенасыщенных интервалов. Это позволяет значительно повысить нефтеотдачу и улучшить технико-экономические показатели эксплуатации залежей.

Цель. Исследование направлено на изучение процесса сшивания полимерных гелей и оценку ключевых параметров этого процесса с использованием различных методов.

Материалы и методы. Особое внимание уделено разработке и внедрению реологического метода для точного количественного определения времени сшивания геля, что позволяет существенно повысить объективность и воспроизводимость результатов по сравнению с традиционной визуальной оценкой, которая на данный момент является единственным общепринятым методом.

Результаты. Установлено, что визуально полная сшивка наблюдается в интервале 1,5–2 ч после приготовления растворов. В то же время с помощью реометрических измерений время сшивания было зафиксировано существенно раньше. Это подтверждает более высокую точность и чувствительность инструментального метода.

Заключение. Проведённые исследования подтвердили, что использование реометрических методов позволяет с высокой точностью определять время и степень сшиваемости полимеров, что невозможно при визуальной оценке. Это обеспечивает операторов более достоверной информацией о процессе формирования гелевой структуры и позволяет контролировать ключевые параметры гелеобразования на ранних стадиях. Полученные данные подчеркивают важность применения реометрии как надёжного инструмента для объективной оценки сшиваемости полимеров. Такая оценка играет решающую роль при проектировании и внедрении гелеполимерных систем в технологии повышения нефтеотдачи, особенно в условиях осложнённой геологии и высокой обводнённости.

Ключевые слова: сшиваемость полимера, полимерная система, реология, выравнивание профиля проницаемости, гель, реометр.

Как цитировать:

Абдыкалыков С.Е., Сабалдаш В.В. Исследование процесса сшиваемости полимерных материалов для повышения эффективности водоизоляционных составов // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2025. Том 7, №3. С. 59–67. DOI: [10.54859/kjogi108873](https://doi.org/10.54859/kjogi108873).

UDC 54.084

CSCSTI 31.25.15

DOI: [10.54859/kjogi108873](https://doi.org/10.54859/kjogi108873)

Received: 16.05.2025.

Accepted: 23.07.2025.

Published: 30.09.2025.

Original article

Investigation of the Crosslinking Process of Polymer Materials to Enhance the Efficiency of Waterproofing Compounds

Sultangali Ye. Abdykalykov, Valentina V. Sabaldash

Branch of KMG Engineering “KazNIPImunaigaz”, Aktau, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: Currently, a significant portion of the oil fields in Kazakhstan are at the final stages of development, characterised by a steady decline in oil production and a progressive increase in water cut. These processes greatly diminish the efficiency of reservoir operation and make managing hydrocarbon displacement systems more complex. Under current conditions, technologies aimed at limiting and isolating water inflows are becoming increasingly relevant as a key element in enhancing the efficiency of field development. One promising approach in this area is the use of gel-polymer systems capable of selectively blocking highly permeable, water-saturated zones and redirecting filtration flows toward oil-saturated intervals. This allows for a significant increase in oil recovery and improves the technical and economic performance of reservoir development.

Aim: The study aims to investigate the cross-linking process of polymer gels and to evaluate the key parameters of this process using various methods.

Materials and methods: Special attention has been paid to the development and implementation of a rheological method for accurate quantitative determination of gel cross-linking time, which significantly enhances the objectivity and reproducibility of results compared to traditional visual assessment, which is currently the only generally accepted method.

Results: It has been established that visually complete crosslinking occurs in 1.5–2 hours after the preparation of solutions. At the same time, rheometric measurements showed that crosslinking occurred significantly earlier. This confirms the higher accuracy and sensitivity of the instrumental method.

Conclusion: The studies confirmed that rheometric methods allow high-precision determination of the time and degree of polymer crosslinking, which is impossible with visual assessment. This provides operators with more reliable information about the gel structure formation process and allows them to control the key parameters of gel formation at early stages. The data obtained emphasise the importance of rheometry as a reliable tool for objective evaluation of polymer crosslinking. Such evaluation plays a crucial role in the design and implementation of gel-polymer systems in oil recovery enhancement technology, especially in conditions of complicated geology and high water cut.

Keywords: polymer crosslinkability; polymer system; rheology; intake profile alignment; gel; rheometer.

To cite this article:

Abdykalykov SY, Sabaldash VV. Investigation of the Crosslinking Process of Polymer Materials to Enhance the Efficiency of Waterproofing Compounds. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2025;7(3):59–67. DOI: [10.54859/kjogi108873](https://doi.org/10.54859/kjogi108873).

ӨОЖ 54.084
ГТАХР 31.25.15

DOI: [10.54859/kjogi108873](https://doi.org/10.54859/kjogi108873)

Қабылданды: 16.05.2025.
Мақұлданды: 23.07.2025.
Жарияланды: 30.09.2025.

Түпнұсқа зерттеу

Су оқшаулағыш құрамдардың тиімділігін арттыру үшін полимерлі материалдардың өзара байланыстыру процесін зерттеу

С.Е. Әбдіқалықов, В.В. Сабалдаш

ҚМГ Инжиниринг «ҚазГЗЖИмұнайгаз» филиалы, Ақтау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Қазіргі уақытта Қазақстанның мұнай кен орындарының едәуір бөлігі игерудің кеш сатысында тұр, бұл мұнай дебиттерінің тұрақты төмендеуімен және өнім сулануының үдемелі өсуімен қатар жүреді. Бұл процестер қабаттарды пайдалану тиімділігін айтарлықтай төмендетеді және көмірсутектерді ығыстыру жүйесін басқаруды қиындатады. Қалыптасқан жағдайда кен орындарын игеру тиімділігін арттырудың негізгі элементі ретінде су ағындарын шектеуге және оқшаулауға бағытталған технологиялар ерекше өзектілікке ие болады. Бұл саладағы перспективті бағыттардың бірі су өткізгіштігі жоғары аймақтарды іріктеп блоктау және сұзу ағындарын мұнайға қаныққан интервалдарға қарай қайта бөлу мүмкіндігі бар гель-полимерлі жүйелерді пайдалану болып табылады. Бұл мұнай өндіруді едәуір арттыруға және кен орындарын пайдаланудың техникалық-экономикалық көрсеткіштерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Мақсаты. Зерттеу полимерлі гельдерді өзара байланыстыру процесін зерттеуге және әртүрлі әдістерді қолдана отырып осы процестің негізгі параметрлерін бағалауға бағытталған.

Материалдар мен әдістер. Гельді өз ара байланыстыру уақытын дәл сандық анықтау үшін реологиялық әдісті әзірлеуге және енгізуге ерекше назар аударылады, бұл қазіргі уақытта жалғыз қабылданған әдіс болып табылатын дәстүрлі визуалды бағалаумен салыстырғанда нәтижелердің объективтілігі мен қайталануын айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді.

Нәтижелері. Ерітінділерді дайындағаннан кейін көзбен бақылау арқылы гель ерітіндісінің өз ара байланысы 1,5–2 сағат ішінде байқалатыны анықталды. Сонымен қатар, реометриялық өлшеулер арқылы өз ара байланысу уақыты айтарлықтай ертерек тіркелді. Бұл аспаптық әдістің жоғары дәлдігі мен сезімталдығын растайды.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеулер реометриялық әдістерді қолдану полимерлердің өзара байланысу уақыты мен дәрежесін жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік беретінін растады, бұл визуалды бағалау кезінде мүмкін емес. Бұл операторларға гель құрылымын қалыптастыру процесі туралы сенімді ақпарат береді және гелдің негізгі параметрлерін ерте кезеңдерде бақылауға мүмкіндік береді. Алынған деректер полимерлердің өзара байланысын объективті бағалаудың сенімді құралы ретінде реометрияны қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Мұндай бағалау гель-полимерлік жүйелерді жобалау мен енгізуде, әсіресе күрделі геология мен жоғары сулану жағдайында мұнай өндіруді арттыру технологиясында шешуші рөл атқарады.

Негізгі сөздер: полимердің өз ара байланысы, полимер жүйесі, реология, қабылдау профилін туралау, гель, реометр.

Дәйексөз келтіру үшін:

Әбдіқалықов С.Е., Сабалдаш В.В. Су оқшаулағыш құрамдардың тиімділігін арттыру үшін полимерлі материалдардың өзара байланыстыру процесін зерттеу // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2025. 7 том, №3, 59–67 б. DOI: [10.54859/kjogi108873](https://doi.org/10.54859/kjogi108873).

Введение

Высокая обводненность добываемой продукции является одной из причин, приводящих к выводу скважин из эксплуатации, в связи с чем работы по ограничению и изоляции водопритоков являются неотъемлемой частью проводимых геолого-технических мероприятий на месторождениях [1]. Для скважин нефтяных месторождений проблема повышения эффективности составов и технологий водоизоляции стоит весьма остро [2].

Развитие технологий и значительное многообразие геолого-физических характеристик разрабатываемых месторождений оказало влияние на создание большого количества различных материалов, что привело к существенному расширению технических решений, применяемых при проведении мероприятий по ограничению водопритока [1, 2].

Одной из основных целей исследования является определение реомеханических свойств химического реагента, применяемого с целью выравнивания профиля приемистости (далее – ВПП). Результатом применения технологии ВПП является увеличение объёмного охвата продуктивных пластов за счёт перераспределения фильтрационных потоков, снижение или стабилизация обводненности, сокращение объёма попутно добываемой воды, получение дополнительной добычи нефти.

Важной характеристикой этих реагентов является сшиваемость в течение определённого времени (создание сшитой полимерной структуры посредством образования межмакромолекулярных связей), что позволяет контролировать момент закачки подвижного геля в пласт. Это критически важно для того, чтобы обеспечить его максимально дальнюю проницаемость в пласты, улучшая таким образом эффективность водоизоляции и перераспределения фильтрационных потоков. Сшиваемые полимеры позволяют более эффективно контролировать фронт вытеснения нефти, что помогает избежать неэффективных закачек, когда вода или другие жидкости проходят через пористую среду без извлечения нефти.

К химическим реагентам, применяемым для водоносных пластов, относятся гелеобразующие составы, сшитые полимерные системы и набухающие композиции. Макромолекулы полимера сшиваются ионами многовалентных металлов. Полученная при сшивке гелевая композиция обладает высокой вязкостью и упругими свойствами, что способствует эффективной изоляции водонасыщенных пор в зонах с высокой проницаемостью пласта.

Настоящая работа направлена на определение точного времени сшиваемости полимерной системы через сопоставление его с общепринятой визуальной оценкой и измерение с использованием автоматического реометра. Новизна исследования заключается в разработке и внедрении реологического метода для точного количественного определения вре-

мени сшивания геля, что позволяет существенно повысить объективность и воспроизводимость результатов по сравнению с традиционной визуальной оценкой, которая на данный момент является единственным общепринятым методом. Предложенный подход может быть интегрирован в регулярные аналитические процедуры, что открывает новые возможности для контроля качества и оптимизации технологических процессов.

Материалы и методы

Объектами исследований были образцы полимеров и сшивающего агента. Сшивание полимеров может существенно повлиять на их физико-химические свойства, такие как вязкость, прочность и устойчивость, что непосредственно сказывается на их применении в различных методах повышения нефтеотдачи.

Сшивание полимеров приводит к увеличению их молекулярной массы и улучшению их способности к образованию сетчатых структур. Это способствует повышению вязкости водных растворов, что делает их более эффективными при закачке в пласт.

Полимер 1 представляет собой низкомолекулярный полиакриламид (ММ ≈ 4 Да) с низкой степенью гидролиза ($\sim 2\%$). Он готовился с концентрацией 1,5% с добавлением 0,5% ацетата хрома в качестве сшивателя. Такая композиция формирует жёсткую и плотную сетку, поскольку короткие цепи располагаются компактно и подвергаются быстрому и интенсивному сшиванию. Высокая температура ($\sim 62^\circ\text{C}$) дополнительно улучшает кинетику реакции, что приводит к быстрому формированию прочного трёхмерного геля.

Полимер 2 – это высокомолекулярный полиакриламид (ММ ≈ 10 Да) с более высокой степенью гидролиза ($\sim 7\%$). Он готовился с концентрацией 0,5% с добавлением 0,05% ацетата хрома в качестве сшивателя. Благодаря более длинным цепям и меньшей степени сшивания образующийся гель характеризуется мягкой, деформируемой структурой, что связано с большей подвижностью и свободой колебаний макромолекул. Сетка формируется более рыхлой, что снижает модуль упругости и вязкость по сравнению с вариантом 1.

Таким образом, гель полимера 1 относится к категории жёстких, сильно сшитых гелей с высокой механической прочностью, а гель полимера 2 – к мягким, слабосшитым гелям, пригодным для применений, где важна эластичность.

Метод визуального контроля

Визуальная оценка заключается в следующем: свежеприготовленные гелеполимерные системы наливают в колбы, закрывают пробками герметично и термостатируют в течение 72 ч до полной сшиваемости при пластовой температуре 62°C . Каждые 20 мин проводят оценку однородности и прочности геля согласно следующим критериям (рис. 1) [3]:

– А – видимый гель не образуется. Гелевый

раствор имеет ту же вязкость, что и исходный полимерный раствор;

– В – гель с высокой текучестью. Визуально гель кажется лишь более липким (немного), чем исходный полимерный раствор;

– С – текучий гель. Большая часть геля стекает в горлышко сосуда и обратно;

– D – умеренно текучий гель. Небольшая часть (примерно 5–15%) геля стекает в узкое горлышко сосуда и обратно. Обычно это характеризуется как «языкообразный» гель;

– E – почти не текучий гель. Гель не затекает в горлышко сосуда;

– F – легкодеформируемый гель. Гель не перетекает в крышку бутылки при переворачивании;

– G – умеренно деформируемый, но не текучий гель;

– H – слегка деформируемый, но не текучий гель. При переворачивании сосуда вверх дном поверхность изгибается;

– I – жёсткий гель. Поверхностный изгиб не виден;

– J – звенящий гель. Звон можно почувствовать после того, как постучать по сосуду.

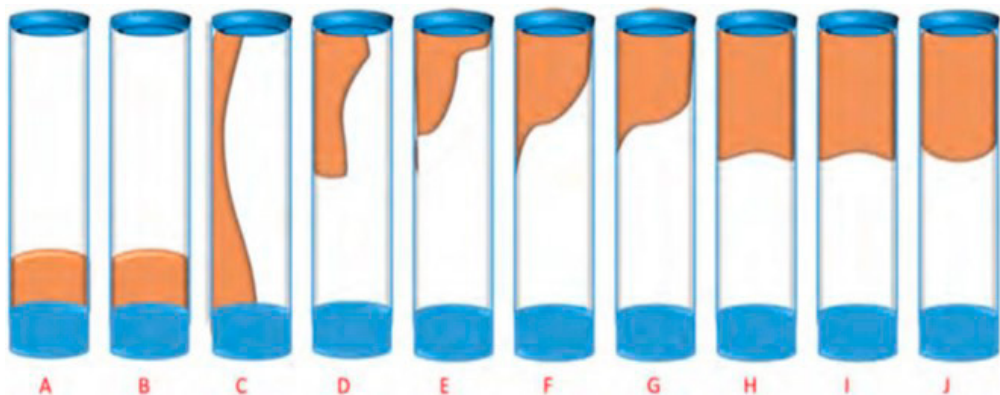


Рисунок 1. Пример визуальной оценки состояния геля
Figure 1. Example of a visual evaluation of the gel condition

A – видимый гель не образуется / no visible gel forms; B – гель с высокой текучестью / highly fluid gel; C – текучий гель / fluid gel; D – умеренно текучий гель / moderately fluid gel; E – почти не текучий гель / almost non-fluid gel;

F – легкодеформируемый гель / easily deformable gel; G – умеренно деформируемый, но не текучий гель / moderately deformable but non-fluid gel; H – слегка деформируемый, но не текучий гель / slightly deformable but not fluid gel;

I – жёсткий гель / hard gel; J – звенящий гель / ringing gel

Реологический метод

Определение точного времени сшиваемости полимерной системы проводилось на автоматическом реометре MCR 702, Anton Paar⁴. Конструкция реометра включает встроенный термостат на основе элементов Пельтье, который поддерживает стабильную температуру испытуемого полимерного состава и обеспечивает точную настройку требуемой температуры. Реометр в режиме колебательных деформаций позволяет исследовать реологические свойства материала, не разрушая его структуру, что особенно важно при изучении структурно чувствительных систем. Осцилляционные исследования дают возможность определить линейно-вязкоупругий диапазон, в котором материал сохраняет свою внутреннюю структуру при деформации. В рамках этих измерений можно получить такие параметры, как модуль упругости (G') и модуль потерь (G''), характеризующие, соответственно, упругие и вязкие свойства системы. Как раз эти параметры использовались для оценки степени сшиваемости и времени сшивки полимера без разрушения его структуры. В отличие

от традиционного режима, при котором полимер подвергается разрушительной деформации, осцилляционные испытания позволяют проводить анализ в условиях малых колебательных деформаций, при которых образец сохраняет свою целостность и не разрушается. Это особенно важно для сохранения естественной структуры материала и получения достоверных данных о механизме и кинетике сшивания. Таким образом, можно объективно оценить процесс формирования сетки в реальном времени, не нарушая внутреннюю организацию системы.

Гелеполимерная система сразу после приготовления помещалась в реометр, на котором задавались следующие параметры:

- частота колебания – 1 Гц;
- деформация – 1%;
- расстояние между пластинами – 1 мм

(рис. 2);

- температура – 62°C.

Данные параметры позволяют фиксировать сопротивление без разрушения системы, а также равномерно поддерживать температуру.

⁴ Високотехнологичный автоматический реометр, предназначенный для точных измерений реологических свойств жидкостей и полутвёрдых материалов, входит в линейку реометров MCR (Modular Compact Rheometer), известных своей универсальностью и высокой точностью.



Рисунок 2. Внешний вид пластин автоматического реометра с интервалом между ними 1 мм
Figure 2. Appearance of automatic rheometer plates with 1 mm gap

Результаты и обсуждение

Результаты визуальной оценки времени образования сшитой полимерной структуры

При термостатировании наблюдалось постепенное сшивание полимерной структуры полимеров.

Окончание сшивания полимерной системы из полимера 1 было зафиксировано спустя 2 ч с момента приготовления раствора (рис. 3).

По результатам визуальной оценки образовался звенящий гель.

Полная сшивка раствора на основе полимера 2 была зафиксирована через 1 ч 40 мин после приготовления (рис. 4).

В связи с тем, что концентрация полимера и сшивателя в данной гелеполимерной системе значительно ниже, чем в растворе на основе полимера 1, сшитый гель – визуально мягкий, с большей подвижностью.

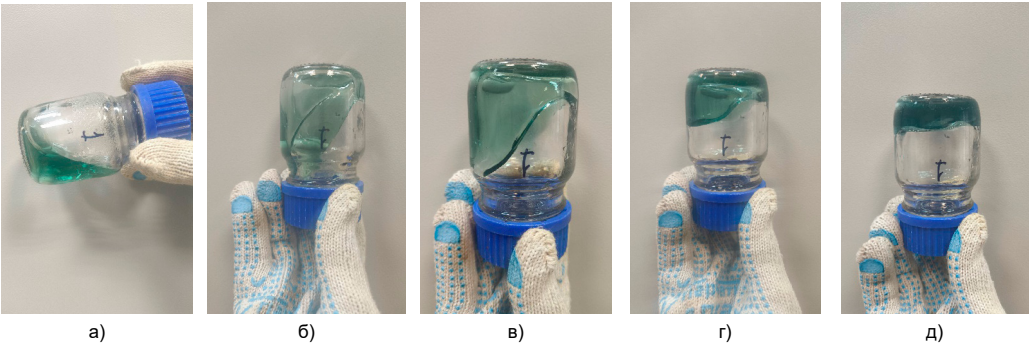


Рисунок 3. Процесс сшивания полимерной системы на основе полимера 1 в течение 2 ч
Figure 3. The process of crosslinking a polymer system based on polymer 1 for 2 hours

а) видимый гель не образуется / no visible gel forms; б) текучий гель / fluid gel; в) легкодеформируемый гель / easily deformable gel; г) слегка деформируемый, но не текучий гель / slightly deformable but not fluid gel; д) звенящий гель / ringing gel

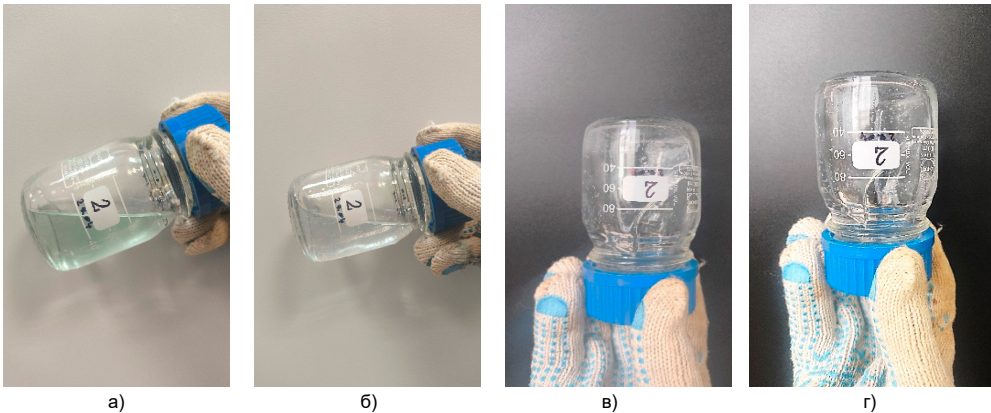


Рисунок 4. Процесс сшивания полимерной системы на основе полимера 2 в течение 1 ч 40 мин
Figure 4. Process of crosslinking a polymer system based on Polymer 2 for 1 h 40 min

а) видимый гель не образуется / no visible gel forms; б) гель с высокой текучестью / highly fluid gel; в) текучий гель / fluid gel; г) умеренно текучий гель / moderately fluid gel

Результаты исследования на автоматическом реометре

Исследования раствора на основе полимера 1

Эксперимент проводился в осцилляционном режиме time sweep («по времени») с целью отслеживания изменений механических свойств материала во времени. При этом использовалась фиксированная частота колебаний и постоянная деформация около 1%, соответствующая линейной области вязкоупругости исследуемого геля. Эта область была предварительно определена с помощью амплитудного теста, чтобы исключить нелинейные эффекты.

При исследовании раствора на основе полимера 1 модуль упругости G' значительно увеличивается со временем – от ~2000 до 6,3 млн мПа (6,3 кПа). Такой резкий рост указывает на протекающую гелеобразующую реакцию, характерную для систем, содержащих хром (III) и амидные группы.

Модуль потерь G'' также увеличивается, но более медленно. С самого начала модуль упругости G' выше G'' , что указывает на наличие упруго-доминантных свойств материала (гель), однако процесс сшивки всё ещё продолжается. Это можно наблюдать в конце эксперимента, когда происходит резкий скачкообразный рост (рис. 5).

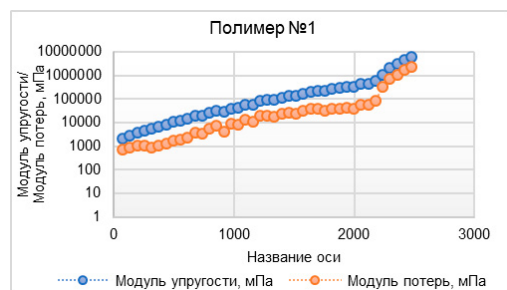


Рисунок 5. Результаты испытаний раствора на основе полимера 1, полученные с использованием автоматического реометра

Figure 5. Test results of the Polymer 1 solution obtained using an automatic rheometer

Начиная примерно с третьей минуты, наблюдается четкий переход: G' пересекает G'' и становится доминирующим, что соответствует переходу системы в твердоподобное состояние. Это связано с формированием трёхмерной сетки в растворе и началом гелеобразования. С этого момента G' продолжает расти, стабильно превышая G'' , что подтверждает развитие и стабилизацию структуры эластичного геля (рис. 6).

Около 57-й минуты фиксируется резкий скачок как модуля упругости, так и модуля потерь. Такой рост свидетельствует о финальной стадии сшиваемости, в ходе которой происходит значительное уплотнение и укрепление гелевой структуры. Это может быть связано либо с за-

Тот факт, что $G' > G''$ с самого начала, говорит о наличии начальной сетки или частично сформированного геля ещё до начала теста. Однако дальнейший рост G' и G'' указывает на продолжающийся процесс сшивания молекул полиакриламида с ацетатом хрома, вероятно, инициированный или ускоренный условиями эксперимента (например, температурой).

Особенно важным является резкий скачок G' в конце эксперимента, который можно интерпретировать как достижение критической степени сшивки или завершение образования пространственной структуры, обеспечивающей макроскопическую упругость системы.

Время полной сшивки гелеполимерной системы на основе полимера 1, зафиксированное на автоматическом реометре, составило 37 мин после приготовления раствора, что почти на 1,5 ч быстрее, чем при визуальной оценке.

Исследования раствора на основе полимера 2

В течение первых двух минут раствор на основе полимера 2 демонстрирует жидкоподобное поведение: модуль упругости (G') значительно ниже модуля потерь (G''), что свидетельствует о преобладании вязкого компонента в системе. Это указывает на то, что структура ещё не сформирована, и реакция межцепной сшивки находится в начальной фазе.

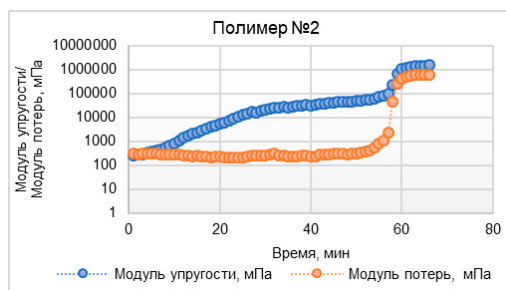


Рисунок 6. Результаты испытаний раствора на основе полимера 2, полученные с использованием автоматического реометра

Figure 6. Test results for a polymer-based solution obtained using an automatic rheometer

вершением химического сшивания, либо с физическими процессами, такими как агрегирование или структурная перестройка сети. В этот момент материал достигает максимальной механической прочности, демонстрируя зрелую и стабилизированную гелевую фазу.

Время сшивки раствора на основе полимера 2 было зафиксировано на автоматическом реометре через 57 мин после приготовления, что на 30 мин раньше, чем при визуальной оценке.

Заключение

В данной работе исследованы образцы полимеров с различной механической прочностью и временем сшивания. Растворы полимеров

готовились с различными концентрациями как полимера, так и сшивающего агента. В ходе проведённого исследования были получены следующие ключевые результаты:

- визуальное наблюдение: полная сшивка полимерной системы на основе полимера 1 была зафиксирована через 2 ч, для полимерной системы на основе полимера 2 – через 1 ч 40 мин;

- испытания на автоматическом реометре: время полной сшивки для полимера 1 составило 37 мин, для полимера 2 – 53 мин.

Полученные с помощью реометра значения существенно отличаются от результатов визуального метода. Это свидетельствует о том, что визуальный метод может занижать точность определения момента завершения процесса сшивания.

Реометр позволяет зафиксировать момент завершения формирования пространственной структуры геля значительно раньше, что может быть критически важно для корректного управления технологическим процессом.

Масштабный фактор в условиях осложнённой геологии и высокой обводнённости значительно влияет на равномерность распределения полимерного раствора и сшивателя в пласте. При сшивании полиакриламида процесс образования сшивок не происходит равномерно по всему объёму пласта в течение условного времени, указанного в технической документации. Это объясняется тем, что при закачке полимерного раствора составы попадают в различные зоны скважины, которые характеризуются неодинаковыми термодинамическими условиями. В частности, в призабойной зоне температура может быть ниже, тогда как при продвижении раствора вглубь пласта наблюдается её повышение. Кроме того, в зонах с мелкопористой структурой теплообмен происходит интенсивнее, что приводит

к ускорению процесса сшивания по сравнению с ожидаемым. В результате гелеобразование может инициироваться раньше запланированного времени, что оказывает существенное влияние на радиус проникновения геля и эффективность изоляционных мероприятий.

Предлагаемый в данной работе метод позволяет более точно прогнозировать динамику сшивания полиакриламида с учётом теплового градиента и геометрических особенностей пласта. Внедрение этого подхода способствует повышению эффективности применения гелеобразующих систем в условиях неоднородных коллекторов.

Знание точного времени сшивания позволяет своевременно корректировать параметры процесса, такие как скорость закачки, концентрацию полимера и сшивающего агента, что, в свою очередь, может повысить стойкость полимерных растворов к агрессивным условиям пластов (высоким температурам, давлениям и химическому воздействию). Это позволяет избежать преждевременной или слишком поздней сшивки, что может привести к неэффективному использованию ресурса или повреждению пористой структуры коллектора. Кроме того, точные данные о времени сшиваемости способствуют более точному прогнозированию поведения полимерных растворов в процессе эксплуатации месторождения, что важно для разработки эффективных стратегий по повышению нефтеотдачи и увеличению срока эксплуатации месторождений.

Таким образом, полученные результаты подтверждают значимость использования реометрических методов для объективной оценки сшиваемости полимеров, что обеспечивает более точный контроль параметров гелеобразования при реализации технологий повышения нефтеотдачи.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Абдыкалыков С.Е. – концепция и дизайн исследования, проведение исследований, интерпретация результатов; Сабалдаш В.В. – проведение исследований, обработка экспериментальных данных, написание и редактирование рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

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

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Sultangali Ye. Abdykalykov – research concept and study design; conducting research, interpreting results; Valentina V. Sabaldash – conducting research, processing experimental data, writing, and editing a manuscript.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерендяев Р.А., Захаров Л.А., Мартюшев Д.А., Дерендяев К.А. Повышение эффективности применения технологии по ограничению водопитока на основании геолого-физических характеристик пластов (на примере месторождений Пермского края) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 9. С. 154–163. doi: [10.18799/24131830/2019/9/2264](https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2264).
2. Дубинский Г.С., Андреев В.Е., Акчурин Х.И., Котенев Ю.А. Развитие технологий ограничения водопитока в добывающие скважины // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. Режим доступа: oilgasjournal.ru/vol_5/dubinsky.html. Дата обращения: 13.04.2025.
3. Sydansk R.D. A Newly Developed Chromium(III) Gel Technology // SPE Reservoir Engineering. 1990. Vol. 5, Issue 03. P. 346–352. doi: [10.2118/19308-PA](https://doi.org/10.2118/19308-PA).

REFERENCES

1. Derendyaev RA, Zakharov LA, Martyshev DA, Derendyaev KA. Improving the efficiency of application of technology on water performance limitation based on geological and physical characteristics of the plates (on the example of deposits of The Perm Region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(9):154–163. doi: [10.18799/24131830/2019/9/2264](https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2264). (In Russ).
2. Dubinsky GS, Andreev VE, Akchurin KI, Kotenev YA. Development of technologies of restriction of water inflow in producing wells. *Actual Problems of Oil and Gas*. Available from: oilgasjournal.ru/vol_5/dubinsky.html. (In Russ).
3. Sydansk RD. A Newly Developed Chromium(III) Gel Technology. *SPE Reservoir Engineering*. 1990;5(03):346–352. doi: [10.2118/19308-PA](https://doi.org/10.2118/19308-PA).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдыкалыков Султангали Ергалиевич

ORCID [0009-0008-2503-4537](https://orcid.org/0009-0008-2503-4537)

e-mail: s.abdykalykov@kmge.kz.

***Сабалдаш Валентина Валерьевна**

ORCID [0009-0004-0158-1852](https://orcid.org/0009-0004-0158-1852)

e-mail: v.sabaldash@kmge.kz.

AUTHORS' INFO

Sultangali Ye. Abdykalykov

ORCID [0009-0008-2503-4537](https://orcid.org/0009-0008-2503-4537)

e-mail: s.abdykalykov@kmge.kz.

***Valentina V. Sabaldash**

ORCID [0009-0004-0158-1852](https://orcid.org/0009-0004-0158-1852)

e-mail: v.sabaldash@kmge.kz.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author