

УДК 622.276.6
DOI 10.56525/PLXT9006

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАКРИЛАМИДОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

А.Р. Тогашева¹, А. Алданыш¹, О.Ф. Хайитов²

¹Университет Есенова, Актау, Казахстан

e-mail: aliya.togasheva@yu.edu.kz; asset.aldanysh@yu.edu.kz

²Ташкентский государственный университет; Республика Узбекистан

e-mail: o_hayitov@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрены особенности применения технологии полимерного заводнения на зрелом месторождении Узень. Проанализированы основные факторы, влияющие на вязкость и стабильность полимерных растворов, включая молекулярную массу полиакриламида, минерализацию закачиваемой воды, пластовую температуру, структуру пористой среды, а также механическую, термоокислительную и биологическую деструкцию полимера. Показано, что время растворения полимера в промышленных условиях существенно меньше лабораторного, что обусловлено гидродинамическими особенностями системы приготовления и закачки растворов, режимами перемешивания и скоростями течения в линиях нагнетания. Представлены методы расчета вязкостных характеристик полимерных растворов с учетом условий пласта и свойств флюидов. Даны рекомендации по выбору марки и оптимальной концентрации полимера, обеспечивающие устойчивость реологических свойств, технологическую надежность процесса закачки и высокую эффективность полимерного заводнения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации технологий повышения нефтеотдачи на зрелых и высокообводненных месторождениях в аналогичных геолого-физических условиях. Отдельное внимание уделено вопросам масштабирования лабораторных данных, оценке рисков деградации полимера и обоснованию технологических параметров закачки при длительной эксплуатации нагнетательных скважин в условиях неоднородных коллекторов, изменяющейся минерализации воды и повышенных пластовых температур региона.

Ключевые слова: Полимерное заводнение; полиакриламид; вязкость растворов; механическая и термоокислительная деструкция; зрелые месторождения; стабильность полимеров.

Введение. Среднемировой коэффициент извлечения нефти оценивается в 35%. Дополнительная добыча этой “легкой нефти” зависит от наличия надлежащих технологий, экономической целесообразности и эффективных стратегий управления пластами. С другой стороны, вероятность обнаружения гигантских месторождений заметно снижается [1].

Уровень открытий гигантских месторождений достиг своего пика в конце 1960-х и начале 1970-х годов и заметно сократился за последние два десятилетия [2]. Около тридцати гигантских месторождений составляют половину мировых запасов нефти и большинство из них отнесены к категории зрелых месторождений. Разработка этих месторождений требует новых и экономически целесообразных методов и надлежащих стратегий управления коллекторами [3,4].

Нефтяные месторождения после определенного периода добычи называются зрелыми месторождениями. Более конкретное определение зрелости — это месторождения, достигающие пика своей добычи, или добывающие месторождения в режиме снижения добычи. Третьим определением является то, что месторождения, достигают своего экономического предела после первичных и вторичных восстановительных работ.

Материалы и методы. Месторождение Узень расположено на территории Мангистауской области республики Казахстан, к востоку от Каспийского моря. Это

крупнейшее нефтяное месторождение Среднекаспийского бассейна. Разведочное бурение было начато в 1962 г, и к 1964-му году была очерчена основная часть структуры. Узеньская нефть характеризуется высоким содержанием парафина (до 28%). Осаждение парафина в результате снижения давления и пластовой температуры ведёт к ухудшению проницаемости низкопроницаемых пропластков.

Считается [3], что на интенсивность образования органических отложений влияют различные факторы, однако основополагающим является **групповой химический состав нефти**. В частности, ключевую роль играет количественное содержание в нефти высокомолекулярных соединений - парафинов, смол и асфальтенов, которые определяют характер процессов структурообразования в нефтяной системе. Важными являются не только их абсолютные концентрации, но и состав, молекулярная структура и взаимное соотношение компонентов [5,6]. Именно эти параметры определяют характер взаимодействия высокомолекулярных компонентов нефти при пониженных температурах, когда возрастают силы межмолекулярного взаимодействия между отдельными соединениями, способствуя образованию органических отложений.

Время растворения полимеров

Более 90% полимеров акриламида выпускается в виде порошка с содержанием основного вещества примерно 89-92 %. Процесс растворения полимеров происходит в линии нагнетания, которая включает подземные трубопроводы от узла дозировки полимера до устья нагнетательных скважин. Закачивание полимерной пульпы с последующим растворением происходит, в подавляющем большинстве случаев, через НКТ. Закачивание через затрубное пространство может быть использовано с целью увеличения времени движения и, соответственно, растворения полимера.

Технологические требования к полимерам акриламида предусматривают, чтобы время растворения порошкообразного полимера в пресной воде не превышало 60 мин, в минерализованных водах 240 мин.

Вязкостные характеристики полимерных растворов

Уровень вязкости воды, загущенной полимером, в наибольшей степени определяет эффективность технологии полимерного заводнения. Точные значения вязкости могут быть получены только на основании лабораторных экспериментов.

Как показано в предыдущих разделах, на величину вязкости полимерных растворов влияют молекулярные характеристики полимера, а также минерализация растворителя и температура. Для высокомолекулярных полимеров акриламида характерно проявление реологических свойств – зависимости динамической вязкости от режима течения. В пористой среде, при течении полимерных растворов, на величину вязкости влияет также характер строения пористой среды.

Естественно, учесть все эти параметры в рамках теоретической модели вязкости невозможно. Однако, с большой долей приближения рассчитать величину вязкости полимерных растворов возможно, используя накопленные данные по вязкости полимерных растворов в стандартных условиях.

Стандартизация предусматривает идентичность условий испытания полимеров по минерализации растворителя, температуре, диапазону сдвиговых нагрузок, в котором производится измерение динамической вязкости полимерных растворов.

Для месторождения Узень в качестве растворителя полимера можно использовать модель сточной и морской воды.

Накопленная база данных по технологическим характеристикам полимерных растворов позволяет на основании расчетов, без проведения экспериментов рассчитывать значения вязкости растворов полимеров различных марок и проводить предварительный выбор полимеров с высокой загущающей способностью.

Для расчета вязкости могут быть использованы математические модели вязкости, например, уже упоминавшаяся модель Хаггинса:

$$\frac{\eta_{\text{отн}}}{c} - 1 = [\eta] + K_x \cdot c \cdot [\eta]^2 \quad (1)$$

где $\eta_{\text{отн}}$ - относительная вязкость раствора полимера;
 c - концентрация полимера в растворе, г/дл;
 K_x - константа Хаггинса;
 $[\eta]$ - характеристическая вязкость, дл/г.
 и модель В.П. Будтова

$$H_{\text{max}} = H_0 (1 + c[\eta]\gamma)^{1/\gamma} \quad (2)$$

где H_{max} - максимальная ньютоновская вязкость раствора, мПа*с,
 H_0 - вязкость растворителя, мПа*с,
 c - концентрация полимера в растворе, г/дл;
 $[\eta]$ - характеристическая вязкость полимера в данном растворителе, дл/г;
 γ - параметр межмолекулярных гидродинамических взаимодействий, характеризующий взаимное сжатие макромолекулярных клубков в умеренно-концентрированном растворе, зависящее от термодинамического качества растворителя.

Представляемые модели отражают зависимость вязкости от концентрации полимера. В уравнения также входит молекулярная характеристика в виде характеристической вязкости, которая функционально связана с величиной молекулярной массы (наиболее часто используется уравнение Марка-Куна-Хаувинка):

$$[\eta] = K \cdot M^a \quad (3)$$

где K, a - эмпирические константы.

Влияние степени гидролиза на величину молекулярной массы может быть рассчитано с использованием подхода, разработанного в институте «Гипростокнефть» под руководством Л.В.Минеева. На основании прямого измерения молекулярной массы методом светорассеяния и параллельного определения характеристической вязкости, образцов с различной степенью гидролиза было получено следующее соотношение:

$$[\eta] = \frac{\sqrt{2}}{c} \cdot \sqrt{\eta_{i \text{ дел}} - 1 - \ln \eta_{i \text{ дел}}} \quad (4)$$

Таким образом, имея паспортные данные по молекулярным характеристикам той или иной марки полимера, можно приближенно рассчитать вязкость при различных концентрациях ПАА и подобрать требуемый уровень концентрации.

Расчеты, проводимые по вышеприведенным формулам, дают значения вязкости, отнесенные к узкой области скоростей сдвига. Для полимеров акриламида, особенно высокомолекулярных, характерно чрезвычайно выраженное проявление реологических свойств, т.е. зависимости динамической вязкости от скорости сдвига.

Типичная картина зависимости вязкости от режима течения в широком диапазоне скоростей сдвига представлена на рисунок 1.

Во всем диапазоне зависимость вязкости от скорости сдвига может быть описана уравнением Саггеа:

$$\mu_G = \frac{\mu_{\text{max}}}{[1 + (G \cdot \tau_p)^2]^m} \quad (5)$$

где μ_G - вязкость рас
 μ_{max} - максимальная ньютоновская вязкость, отвечающая условию $\mu_{\text{max}} = \mu_G$, при $G=0$, мПа*с,
 τ_p - время релаксации, с,

m- индекс сдвигового разжижения, характеризующий степень проявления неньютоновского поведения.

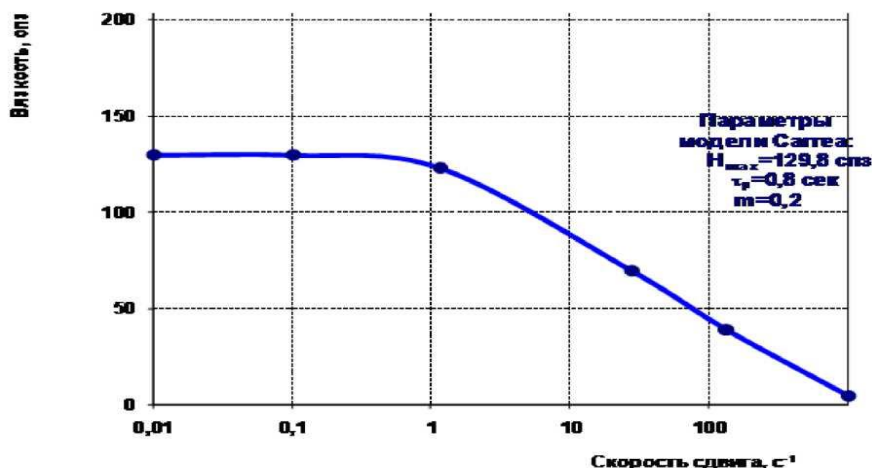


Рисунок 1 - Зависимость вязкости раствора полимера от скорости сдвига

Приводимое уравнение Саггеа является типичным трансцендентным уравнением, которое может быть решено исключительно численным методом. Точность решения во многом зависит от имеющихся экспериментальных данных по значениям наибольшей ньютоновской вязкости. Получение таких данных не всегда возможно из-за отсутствия вискозиметров, позволяющих проводить измерения при скоростях сдвига менее 1 с⁻¹ (т.н. low-shearviscometers).

Значения наибольшей ньютоновской вязкости в реальных условиях, т.е. в условиях конкретного пласта, практически никогда не реализуются. Диапазон реальных скоростей сдвига при фильтрации в пористой среде обычно превышает значение 1 с⁻¹.

Реальные значения скоростей сдвига, реализуемые при закачке полимерных растворов в конкретную скважину, могут быть рассчитаны из уравнения

$$j = v \sqrt{\frac{2m}{k}}, \text{ где} \tag{6}$$

j - скорость сдвига в пористой среде, с⁻¹,

v - линейная скорость фильтрации, м/с,

m - пористость пласта,

k- проницаемость пласта, мкм².

Например, для типичных параметров пласта *k*<0,2 мкм², *t*=0,22 и скорости фильтрации в удаленной зоне пласта 0,5 м/сут, скорость фильтрации составит

$$j = \frac{0,5}{86400} \sqrt{\frac{2 \cdot 0,22}{0,2 \cdot 10^{-12}}} = 8,6 \text{ с}^{-1} \tag{7}$$

В подавляющем большинстве реальных скоростей сдвига (как усредненных, так и в отдельных пропластках, слагающих продуктивный пласт) относится к области реологической кривой (рисунок 1), отражающей псевдопластический характер течения.

Математическое описание этой области не требует применения трансцендентных уравнений и достаточно корректно описывается при использовании элементарных функций (экспоненциальной, логарифмической, а лучше всего степенной).

Таким образом, располагая паспортными данными по молекулярным характеристикам полимера, базой данных по реологическим характеристикам полимерных растворов в стандартных условиях, может быть рассчитан диапазон вязкостных свойств растворов полимеров конкретной марки как функция концентрации полимера и скорости сдвига в

пористой среде.

Стабильность полимерных растворов

Одним из недостатков гибкоцепных синтетических полимеров акриламида является их подверженность механической, термоокислительной и биологической деструкции. В результате деструкции происходит разрыв макромолекулярных цепочек, уменьшение молекулярной массы полимера и, как следствие, снижение загущающей способности полимерного реагента.

Механическая деструкция имеет место при приложении к молекулам полимера механических нагрузок, превышающих некоторое критическое значение. Мерой нагрузки может являться, например, скорость сдвига.

При течении жидкости в каналах круглого сечения скорость сдвига рассчитывается по формуле:

$$j = \frac{4Q}{\pi \cdot r^3} = \frac{8v}{d} \quad (8)$$

j - скорость сдвига, с

Q - объемный расход, м³/с,

v - линейная скорость, м/с,

r - радиус канала, м,

d - диаметр канала, м.

При течении в трещинах скорость сдвига также пропорциональна линейной скорости фильтрации и обратно пропорциональна характерному размеру

$$j = \frac{12V}{b} \quad (9)$$

b - ширина (раскрытие) трещин, м.

Здесь характерным размером поровых каналов является корень из проницаемости. Как видно из вышеприведенных формул, скорость сдвига пропорциональна линейной скорости движения жидкости и обратно пропорциональна размерам проводящих каналов. Максимальная механическая нагрузка имеет место при сочетании обоих признаков. Наглядно разрушение полимера в результате механической деструкции прослеживается в результате т.н. дроссельного эффекта - истечении жидкости через узкие отверстия из линии высокого давления.

При реализации технологии полимерного заводнения механическая деструкция полимеров имеет место в узлах насосов (по этой причине недопустимо для перекачки полимерных систем использовать центробежные насосы), в сужении трубопроводов.

Механическая деструкция в пористой среде имеет место только в ближней призабойной зоне, на малом удалении от ствола скважины. По мере увеличения радиуса фильтрации скорость фильтрации гиперболически уменьшается и вероятность механической деструкции приближается к нулю.

Таким образом, при большой длительности полимерного заводнения, обычно измеряемого годами, процесс механического разрушения полимеров в результате деструкции очень короткий и составляет несколько часов. Другой особенностью механической деструкции полимеров является то, что за длительное время исследования этого процесса не выявлены марки полимеров, отличающиеся повышенной стойкостью к механической деструкции или добавки, увеличивающие эту стойкость. Безусловно, марки полимеров, перспективные для технологии полимерного заводнения, должны тестироваться на предмет стойкости к механической деструкции, но этот тест является сугубо экспериментальным.

Результаты исследований. Анализ литературных данных и собственный многолетний опыт работы с полимерами показывает, что время растворения большинства коммерческих высокомолекулярных полиакриламидов, определенное в лабораторных условиях, достаточно

близко к нормативному времени растворения полимера.

Длительность растворения полимеров, по сравнению с солями и другими низкомолекулярными реагентами, обусловлена исключительно высоким значением молекулярной массы полимера и, соответственно, большой длиной макромолекул.

Процесс растворения полимера проходит через 2 стадии: набухания полимерных частиц и, собственно, растворения - перехода набухших частиц полимера в раствор. Первая стадия является более продолжительной и определяется диффузионными процессами.

Кинетика процесса растворения высокомолекулярных полиакриламидов примерно одинакова для большинства марок. Кинетику растворения достаточно надежно описывает характерное изменение динамической вязкости раствора в процессе растворения полимера

Накопленный и промышленный опыт при разработке и реализации технологии полимерного заводнения показывает, что в большинстве случаев (для большинства коммерческих марок полимеров) время растворения полимера не относится к числу параметров, ограничивающих применение порошкообразных полимеров в технологии полимерного заводнения на конкретном месторождении.

Определенные сложности могут возникать при реализации технологии на месторождениях, где время движения полимерной пульпы от узла дозировки полимера до забоя скважины мало (например, при полимерном заводнении неглубоко залегающих пластов, когда узел дозировки полимера расположен близко от скважины, в которую закачивается полимер).

В этом случае для достижения полноты растворения необходимо использовать установки, предусматривающие дополнительное растворение полимера в специальных узлах (змеевиках или емкостях растворения).

Возможно также применение специальных технологических приемов, направленных на ускорение процесса растворения, например, использование низкомолекулярных веществ (типа минеральных солей), выполняющих роль разрыхлителей полимера в порошке. Быстрое растворение разрыхлителя приводит к увеличению поверхностного контакта полимера с водой и ускорению процессов набухания и растворения полимера. Однако, реализация таких приемов приводит к усложнению процесса и удорожанию технологии.

Необходимо также учитывать, что данные по кинетике и времени растворения полимеров в конкретной воде, полученные в лабораторных условиях в соответствии с РД-39-0148311-206-85, значительно отличаются от данных по времени растворения полимеров в реальных условиях.

Многочисленные промышленные исследования в процессе реализации технологии полимерного заводнения и технологии с применением сшивающихся полимерных систем, с отбором проб по технологической линии движения полимерных композиций показывают, что в промышленных условиях время растворения в 2-3 раза меньше, чем в лабораторных.

По нашему мнению, основанному на собственных лабораторных экспериментах и анализе литературных данных, это различие связано с диффузионным механизмом растворения высокомолекулярных полимеров.

Индивидуальные частицы порошка полимера по форме близки к сферическим, с диаметром большинства частиц в диапазоне 0,2-0,4 мм. Наличие более крупных частиц увеличивает время растворения полимера, мелкие частицы относятся к пылящей фракции, их доля лимитируется техническими требованиями.

По нашим данным, полученным при насыщении частиц под вакуумом инертной жидкостью (изопропиловым спиртом), открытая пористость составляет примерно 13%. Вследствие малых размеров пор суммарная поверхность внутренних каналов чрезвычайно высока и в десятки-сотни раз превышает внешнюю площадь сферической частицы.

При растворении полимера в лабораторных условиях вода смачивает внешнюю поверхность частиц. Стадия набухания полимера достаточно медленная из-за малой поверхности контакта полимера с растворителем. Проникновение же растворителя по поровым каналам затруднено из-за противодействия капиллярных сил.

В реальных условиях промысла частицы полимера в виде полимерной пульпы достаточно быстро попадают на прием насоса и в линию высокого давления.

Давление практически мгновенно от атмосферного возрастает до нескольких десятков кг/см². При таком перепаде давления капиллярные силы подавляются, и вода заполняет каналы частиц полимера, многократно увеличивая поверхность контакта полимер-растворитель и сокращая время растворения полимера.

На стадии анализа рынка полимеров необходимо учитывать, что подверженность к механической деструкции возрастает с увеличением молекулярной массы полимера.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 показана динамика уменьшения молекулярной массы полимера при перемешивании механической мешалкой раствора полимера.

Такой характер влияния молекулярной массы на стойкость к деструкции лишней раз показывает, что следует достаточно осторожно подходить к выбору полимера со сверхвысокой молекулярной массой. Это касается как кинетики растворения полимера, так и стойкости к механической деструкции.

Рост молекулярной массы ПАА уменьшает также стойкость и к термоокислительной деструкции и приводит к ухудшению технологических свойств растворов под действием температуры и добавок, обладающих окислительно-восстановительными свойствами.

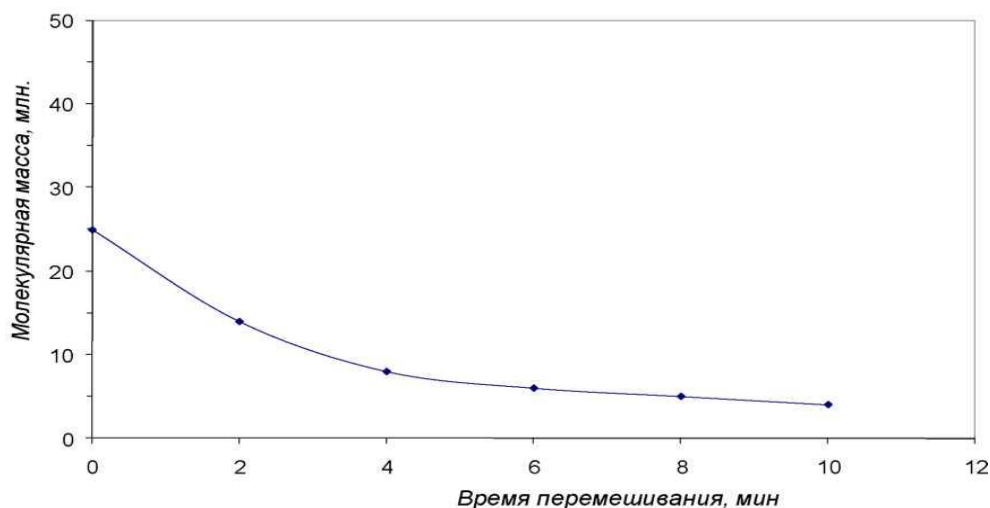


Рисунок 2 - Кинетика механической деструкции полиакриламида в растворе при скорости перемешивания 4000 об/мин

В отличие от механических разрушений, термоокислительная деструкция под действием температуры и активных добавок, содержащихся в воде, породе и в самом полимере, продолжается длительное время - весь период полимерного заводнения. Причем происходит разрушение не только макромолекул, присутствующих в растворе и создающих фактор сопротивления, но и молекул, адсорбированных на породе, благодаря чему возникает остаточный фактор сопротивления.

В отличие от механической деструкции, термоокислительная деструкция является в большей степени управляемым процессом, как в сторону увеличения, так и уменьшения ее скорости. Имеется достаточно много способов увеличения стойкости полимеров к термоокислительной деструкции, в том числе и на стадии синтеза полимеров. К таким способам относится, в частности, удаление активных микропримесей из полимера. Процесс термоокислительной деструкции является цепным радикальным процессом.

Инициировать этот процесс могут следы активных неорганических и органических веществ. Например, добавки меди при ничтожно малой концентрации (менее 0,5 мг/л) могут в несколько раз увеличить скорость термоокислительной деструкции ПАА. Длительное время исходный реагент для полимера (акриламид) получали на медных катализаторах. При этом акриламид и синтезированный из него полиакриламид содержали следы соединений меди, что приводило к завышенной скорости деструкции полимера. В настоящее время передовые

фирмы используют способ получения акриламида на основе биосинтеза. Синтезируемые из него полимеры, соответственно, более термостойкие из-за отсутствия меди.

Другим путем повышение стойкости полимеров к деструкции является уменьшение в полимере остаточного инициатора.

Самым распространенным методом увеличения стойкости полимеров к деструкции является применение стабилизаторов деструкции. Наиболее распространенными стабилизаторами являются химические вещества, содержащие в своем составе серу (так называемые дезактиваторы) - меркаптобензтиазол, меркаптобензимидазол, тиомочевина. Концентрация дезактиваторов (как индивидуальных, так и синергетических смесей) обычно составляет 0,5-1,5% от массы полимера. Такие добавки значительно уменьшают скорость деструкции полимеров в растворах, как в пресной, так и в минерализованной воде.

Перечисленные методы незначительно, но все же увеличивают себестоимость полимера. И далеко не все фирмы - производители ПАА выпускают продукцию, отличающуюся повышенной стойкостью к термоокислительной деструкции. Причиной является не только стремление отдельных фирм экономить на производстве полимеров, но и то, что подбор эффективных стабилизаторов требует большого объема исследований, как физико-химических, так и фильтрационных.

Однако, чисто аналитически, на основе изучения рынка полимеров можно, с большой вероятностью, предсказывать стабильность или нестабильность полимера. Здесь большую роль играет имидж фирмы. Разработать термостабильный полимер - это задача не одного года. Поэтому предпочтение следует отдавать фирмам, чьи предыдущие образцы зарекомендовали себя с лучшей стороны. По данному критерию - стойкости к термоокислительной деструкции, как и по стойкости к механической деструкции, следует достаточно осторожно подходить к выбору высокомолекулярных полимеров по той же причине, что скорость к деструкции возрастает с увеличением молекулярной массы полимера (рисунок 3).

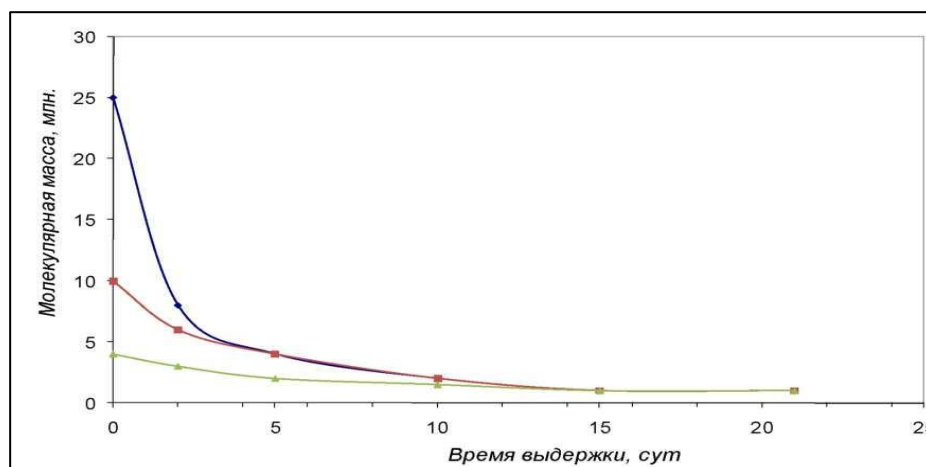


Рисунок 3 - Кинетика термоокислительной деструкции полиакриламидов в водном растворе при температуре 60°C

Что касается биологической деструкции полиакриламида, то эта проблема не столь актуальна, как для полимеров, получаемых по биотехнологии, прежде всего, полисахаридов. По нашему мнению, использовать бактерициды или применять другие приемы для уменьшения биодеструкции полимеров нецелесообразно. Насколько нам известно, ни одна из фирм - изготовителей полимеров акриламида не использует добавок к полимерам, направленных на подавление процессов биодegradации полимеров в технологических растворах.

Обсуждение. Длительность растворения полимеров объясняется высокой молекулярной массой и большой длиной макромолекул. Первая стадия растворения

(набухание) протекает медленно из-за диффузионных ограничений и ограниченного контакта растворителя с поверхностью частиц. В лабораторных условиях проникновение воды по поровым каналам затруднено капиллярными силами, тогда как в промышленных условиях высокое давление подавляет капиллярные силы, ускоряя растворение. Различие между временем растворения в лаборатории и на промысле связано с физическими условиями процесса и транспортной линией полимерной пульпы. Мелкие частицы (пылящая фракция) и большие частицы оказывают разное влияние на кинетику растворения, что имеет значение для оптимизации технологических параметров. Практическое значение этих наблюдений заключается в том, что дополнительные установки или разрыхлители могут ускорять растворение, но увеличивают сложность и стоимость технологии. Сравнение с литературными данными подтверждает, что механизм растворения высокомолекулярных полиакриламидов универсален для большинства марок.

Вязкость полимерных растворов сильно зависит от молекулярной массы полимера, минерализации воды и температуры, а также от особенностей пористой среды пласта. В реальных условиях растворы проявляют псевдопластическое течение, что подтверждает возможность использования расчетных моделей для предварительного подбора полимеров и их концентраций. Механическая деструкция полимеров ограничена малой зоной около скважины и практически не влияет на эффективность процесса. Термоокислительная деструкция может снижать загущающую способность, однако её скорость контролируется выбором термостабильных полимеров и применением стабилизаторов. Биологическая деструкция полиакриламидов в технологических условиях практически не проявляется. Таким образом, правильный подбор марки полимера и концентрации раствора позволяет обеспечить стабильность растворов и высокую эффективность полимерного заводнения.

Выводы. В данной работе рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность технологии полимерного заводнения на примере месторождения Узень. Показано, что вязкость полимерных растворов определяется молекулярной массой полимера, минерализацией воды, температурой и структурой пористой среды пласта, а псевдопластическое течение позволяет применять расчетные модели для предварительного подбора концентрации полимера. Ключевыми ограничителями эффективности являются механическая и термоокислительная деструкция полимеров, при этом механическая деструкция локализована в ближней призабойной зоне, а термоокислительная контролируется выбором термостабильных полимеров и стабилизаторов. Биологическая деструкция полиакриламидов в технологических условиях не оказывает существенного влияния. Практические исследования показали, что время растворения полимера в промышленных условиях существенно меньше, чем в лаборатории, что связано с высокими давлениями и гидродинамикой линий нагнетания. Таким образом, грамотный подбор марки полимера, его молекулярной массы и концентрации раствора позволяет обеспечить стабильность полимерных растворов, оптимизировать технологический процесс и повысить эффективность полимерного заводнения зрелых месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blaskovich, F.T., et al., 1985. Reservoir Management of the Yibal Field in North Oman: A Simulation Approach. Paper SPE 13716 Presented at the 1985 SPE Middle East Oil Tech. Conf. and Exh., Bahrain, Mar. 11–14.
2. Ivanhoe, L.F., 1997. Get ready for another oil shock. *The Futurist* 20 (Jan./Feb.)
3. Black, G., LaFrance, J.T., 1998. Is Hotelling's rule relevant to domestic oil production? *J. Environ. Econ. Manage.* 36, 149–169
4. Al-Attar, A.E., 2004. A review of upstream development policies in Kuwait. *OPEC Rev.* 28, 275–288.
5. Babadagli, T. (2007). Development of mature oil fields — A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 57(3-4), 221–246. doi:10.1016/j.petrol.2006.10.006

6.Hajirezaie, S.; Wu, X.; Peters, C.A. Scale formation in porous media and its impact on reservoir performance during water flooding. J. Nat. Gas Sci. Eng. 2017, 39, 188–202. [CrossRef]

ПОЛИМЕРЛІ СУЛАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДАҒЫ ПОЛИАКРИЛАМИДТЕРДІҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

А.Р.Тогашева¹, А.Алданыш¹, О.Ғ. Хайитов²

¹Есенов университеті, Ақтау, Қазақстан

e-mail: aliya.togasheva@yu.edu.kz; asset.aldanysh@yu.edu.kz

²Ташкент Мемлекеттік университеті; Өзбекстан Республикасы

e-mail: o_hayitov@mail.ru

Аңдатпа. Мақалада жетілген Өзен кен орнында полимерлі суландыру технологиясын қолданудың ерекшеліктері қарастырылған. Полимерлі ерітінділердің тұтқырлығы мен тұрақтылығына әсер ететін факторлар, соның ішінде полиакриламидтің молекулалық салмағы, судың минералдануы, температура, кеуекті орта құрылымы, сондай-ақ полимердің механикалық, термоокислительное және биологиялық ыдырауы талданады. Коммерциялық жағдайларда полимердің еру уақыты инъекция желілерінің гидродинамикалық ерекшеліктерімен байланысты зертханалық жағдайдан едәуір қысқа екендігі көрсетілген. Ерітінділердің тұтқырлық сипаттамаларын есептеу әдістері мен полимерлі су басудың жоғары тиімділігін қамтамасыз ету үшін полимердің маркасы мен концентрациясын таңдау бойынша ұсыныстар берілген.

Түйін сөздер: Полимерлі суландыру; полиакриламид; ерітінділердің тұтқырлығы; механикалық және термо тотығу деструкциясы; жетілген кен орындары; полимерлердің тұрақтылығы.

PHYSICO-CHEMICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POLYACRYLAMIDES IN POLYMER FLOODING TECHNOLOGY

A.R. Togasheva¹, A. Aldanysh¹, O.G. Khayitov²

¹ Yessenov University, Aktau, Kazakhstan

e-mail: aliya.togasheva@yu.edu.kz; asset.aldanysh@yu.edu.kz

²Tashkent State University; Republic of Uzbekistan

e-mail: o_hayitov@mail.ru

Abstract: The article discusses the specifics of the application of polymer flooding technology at the mature Uzen deposit. The factors influencing the viscosity and stability of polymer solutions, including the molecular weight of polyacrylamide, water mineralization, temperature, the structure of the porous medium, and the mechanical, thermal, oxidative, and biological degradation of the polymer, are analyzed. It is shown that the polymer dissolution time under field conditions is significantly shorter than the laboratory time, which is associated with the hydrodynamic features of the injection lines. Methods for calculating the viscosity characteristics of solutions and recommendations for selecting the brand and concentration of polymer to ensure the stability of solutions and high efficiency of polymer flooding are presented.

Keywords: Polymer flooding; polyacrylamide; viscosity of solutions; mechanical and thermal oxidative degradation; mature deposits; stability of polymers.