

УДК 622.276.43:678

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МАРКИ ПОЛИМЕРА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Т.С. Рогова, Ю.Э. Ивина, С.В. Макашкин

Целью работы являлся выбор оптимального реагента для реализации полимерного заводнения в конкретных геолого-физических условиях месторождения Западной Сибири. Для этого проводились исследования растворимости полимеров в закачиваемой воде и их реологических свойств в зависимости от скорости сдвига и концентрации полимера при пластовой температуре, определялись динамическая адсорбция полимеров на поверхности пористой среды и коэффициент вытеснения нефти полимерными растворами. Данные работы выполнялись в соответствии со «Стандартом предприятия», разработанным в АО «ВНИИнефть». По результатам проведенных физико-химических и фильтрационных экспериментов выбран образец полимера, характеризующийся наилучшими показателями. Данный образец может быть рекомендован для реализации технологии полимерного заводнения на месторождении Западной Сибири.

Ключевые слова: полимерное заводнение, полиакриламид, растворимость, динамическая вязкость, фильтруемость, адсорбция, десорбция, коэффициент вытеснения.

Условия эффективного применения метода полимерного заводнения весьма различны и во многом зависят от геолого-физических условий конкретного месторождения, а также от характеристик коллектора и физико-химических свойств насыщающих флюидов (нефти и воды).

Полимерные растворы обладают свойством снижать фазовую проницаемость для воды и сохранять ее для нефти. Водный раствор полимера поступает преимущественно в высокопроницаемые пропластки, причем чем выше проницаемость, тем больше поступает в него полимера, и тем значительно повышается фильтрационное сопротивление высокопроницаемых слоев.

Целью проведенных исследований являлся выбор оптимального реагента для реализации полимерного заводнения в конкретных геолого-физических условиях месторождения Западной Сибири, характеризующегося следующими параметрами:

- тип коллектора поровый, терригенный;
- начальная пластовая температура 16 °С;
- проницаемость по газу 1200 мД;
- начальное пластовое давление 7,6–8,8 МПа;
- вязкость нефти в пластовых условиях 104 мПа*с;
- плотность нефти в пластовых условиях 0,92 т/м³;
- минерализация пластовой (подтоварной) воды 16 г/л;

– содержание ионов (Ca²⁺, Mg²⁺) до 0,5 мг/л.

Опыт экспериментальных исследований [1] показывает, что растворимость полимера полиакриламида (далее – ПАА) в пресной воде и вязкость полученных растворов зависят от молекулярной массы (далее – ММ) полимера: чем меньше ММ, тем лучше растворимость и ниже вязкость получаемых растворов. Однако при увеличении минерализации воды происходит разрушение структуры раствора (молекул), и вязкость раствора может уменьшаться в несколько раз, поэтому в случае высокой минерализации воды концентрация полимера в растворе должна быть в 2–3 раза выше.

С другой стороны, в случае высокой молекулярной массы полимера могут возникнуть проблемы с растворимостью полимера в воде и фильтрующей способностью раствора реагента, например, закупоривание пор коллектора и снижение проницаемости. Кроме того, полимеры с повышенной ММ характеризуются чувствительностью к различным видам деструкции: механической, термической и окислительной, поэтому необходим подбор оптимальной молекулярной массы полимера.

Растворимость в воде полимеров акриламида также зависит от степени гидролиза. Негидролизованый ПАА не растворяется в воде и, соответственно,

не обладает способностью значительно повышать вязкость воды. С другой стороны, высокогидролизированный ПАА (степень гидролиза выше 35%) также нежелателен по той причине, что будет осаждаться ионами поливалентных металлов кальция и магния, содержащихся в пластовой воде. Также известно, что термостабильность ПАА в значительной степени зависит от степени гидролиза: при значениях анионности выше 25% моль термостабильность резко снижается, что важно в условиях месторождений Западной Сибири.

Таким образом, исходя из вышесказанного, полимеры полиакриламида, рекомендуемые для технологий увеличения нефтеотдачи пластов, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- молекулярная масса 10–25 млн дальтон;
- степень гидролиза 15–35%;
- товарная форма – порошок;
- содержание основного вещества не менее 80%.

Согласно разработанным требованиям были подобраны образцы полиакриламида (ПАА) различных марок российского и импортного производства, для которых проводились следующие виды работ:

- исследование растворимости полимеров в закачиваемой воде;
- исследование реологических свойств полимеров в зависимости от скорости сдвига и концентрации полимера при пластовой температуре;

- определение динамической адсорбции полимеров на поверхности пористой среды;

- определение коэффициента довытеснения нефти полимерными растворами.

Эксперименты проводились по методикам, описанным в стандартах [2, 3, 4].

В свободном объеме проведены исследования 14 марок ПАА. Было определено время растворения полимеров в закачиваемой воде с минерализацией 16 г/л в стандартных условиях при температуре 25°С, концентрация полимера в растворе составляла 5000 ppm (0,5% масс.) по товарному продукту.

Результаты определения растворимости полимеров в закачиваемой воде представлены в табл. 1. Как видно из приведенных данных, все исследуемые образцы полимера, кроме образца №5, полностью растворимы в закачиваемой воде. Время растворения составляло от 90 до 240 мин.

Определение динамической вязкости растворов полимеров различных марок проводилось на ротационном вискозиметре марки Brookfield PVS при пластовой температуре 16°С, скорости сдвига от 0,3 до 100 с⁻¹, концентрация полимеров изменялась в диапазоне 0,1–0,2% масс. по товарному продукту.

В табл. 2 представлены обобщенные результаты измерения вязкости растворов полимеров различных марок при скоростях сдвига 1,8 и 7,3 с⁻¹, соответствующих линейным скоростям фильтрации, соот-

Таблица 1. Время растворения образцов полиакриламида различных марок в закачиваемой воде с минерализацией 16 г/л

№ образца ПАА	Время растворения, мин
1	100
2	120
3	90
4	125
5	более 360 (на дне наблюдается нерастворимый осадок)
6	240
7	220
8	140
9	140
10	90
11	150
12	100
13	120
14	120

ветственно, 0,87 и 3,55 м/сут, при концентрации полимера 0,1; 0,15 и 0,2% масс. по товарной форме при пластовой температуре 16°C.

Исходя из опыта проведения полимерного заводнения, вязкость полимерного раствора при линейной скорости фильтрации 1 м/сут в пластовых условиях для конкретного месторождения должна быть не более, чем в 2 раза меньше вязкости вытесняемой нефти и составлять порядка 70 мПа*с. На основании результатов лабораторных исследований реологических характеристик полимерных растворов наименьшая концентрация полимера в растворе, необходимая для получения целевой вязкости в 70 мПа*с, наблюдается на полимерах следующих марок:

образец №9 – 69,8 мПа*с;

образец №14 – 70 мПа*с.

Эти два полимера-финалиста с концентрацией в растворе 0,15% масс. были выбраны для последующих экспериментов. Кроме того, было принято решение исследовать доступный и дешевый ПАА №1, для которого целевая вязкость достигается при концентрации 0,19% масс.

Для выбранных марок полиакриламида была определена фильтруемость растворов – характеристика, показывающая отношение времени истечения определенного объема раствора полимера ко времени истечения такого же объема воды. На рис. 1 представлена кинетика фильтрации закачиваемой воды и растворов выбранных марок образцов полимера.

Таблица 2. Реология растворов полимеров, приготовленных на пластовой воде (16 г/л), при температуре 16°C

№ образца ПАА	Вязкость при скорости сдвига 0,87 м/сут (1,8 с ⁻¹) , мПа*с			Вязкость при скорости сдвига 3,55 м/сут (7,3 с ⁻¹) , мПа*с		
	Концентрация полимера, % масс			Концентрация полимера, % масс		
	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
1	14,8	34	78	13,2	24,5	48,3
2	10	18	34	9,5	15,5	24,5
3	6,9	8,2	12,8	-	-	-
4	16,4	44,0	73,5	13,0	25,0	42,0
5	-	22,6	42	-	17	30,5
6	-	26	50	-	19,5	32,5
7	-	12,0	23,6	-	11,5	-
8	-	34,6	56,8	-	23,2	-
9	14,5	69,8	92	13,5	34,5	54
10	8	12	18	6,5	11,5	16
11	14	28,0	70,3	12,5	23,6	43,5
12	11,5	24,5	50	10,5	21	35,5
13	22	52	102	17,8	35	57,5
14	24	70	96	17,5	40	53

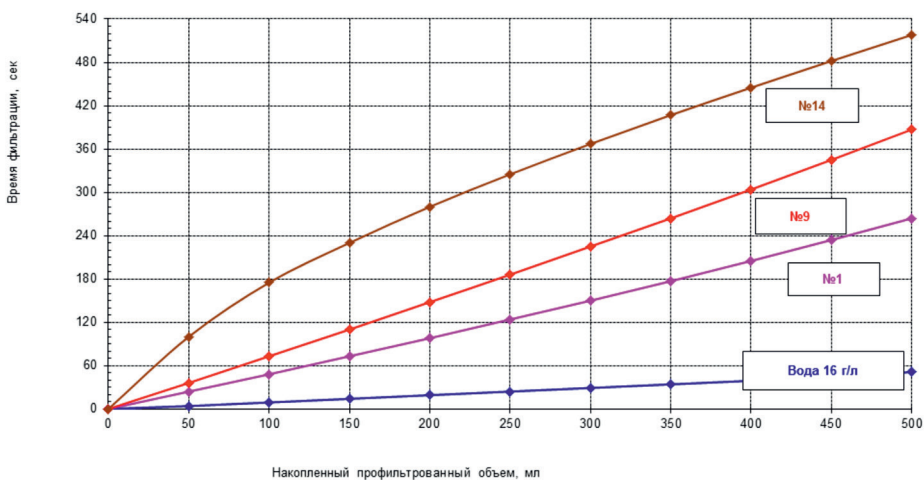


Рисунок 1. Кинетика фильтрации закачиваемой воды и растворов ПАА

Как видно из рисунка, время истечения раствора образца полимера №1 составляет 264 сек, №9 – 388 сек, №14 – 518 сек. Таким образом, фильтруемость полимерных растворов составила:

- для 0,19% раствора образца №1 – 5,2 ед.;
- для 0,15% раствора образца №9 – 7,6 ед.;
- для 0,15% раствора образца №14 – 10,2 ед.

Адсорбция полимеров из растворов в пористой среде является одним из важнейших показателей эффективности их применения для повышения нефтеотдачи. Различают статическую и динамическую адсорбцию.

Для определения статической адсорбции в колбы с навесками дезинтегри-

рованной породы массой 10,0 г наливают по 30,0 г растворов полимера различной концентрации и выдерживают в течение двух суток при пластовой температуре в термостате, при периодическом встряхивании для достижения адсорбционного равновесия.

Затем растворы декантируют и центрифугируют 20–30 мин при скорости вращения 6000–7000 об/мин, и фотометрическим методом определяется равновесная концентрация полимера в растворе после адсорбции. По полученным данным строится график изотермы адсорбции $A = f(C)$, из которого определяется величина предельной статической адсорбции. На рис. 2 представлены результаты определения статической адсорбции для образца полимера №1.

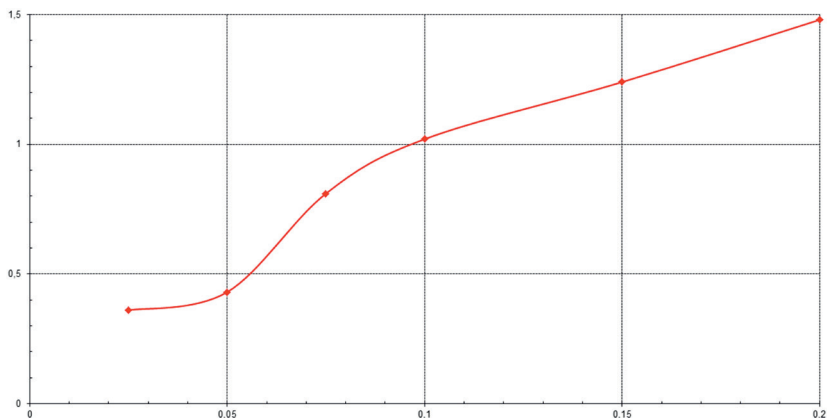


Рисунок 2. Изотерма адсорбции образца полимера №1

Далее с растворами на основе выбранных образцов полимеров были проведены фильтрационные эксперименты на насыпных моделях пласта по определению динамической адсорбции полимера и коэффициента довытеснения нефти водными растворами ПАА. Эксперименты по фильтрации проводились на специальной фильтрационной установке фирмы Core Laboratories, которая предназначена для изучения на насыпных моделях

пласта или ядрах нефтеснабжающих и фильтрационных характеристик различных флюидов в условиях, близких к пластовым.

Фильтрационные эксперименты проводились при следующих пластовых условиях:

$$P = 7,8 \text{ МПа,}$$

$$T = 16^\circ\text{C.}$$

Исследования по определению динамической адсорбции полимера №1 проводились на водонасыщенных насыпных моделях пласта со следующими параметрами (табл. 3).

Таблица 3. Параметры модели пористой среды, используемой в эксперименте по определению динамической адсорбции полимера №1

№ модели	Размеры модели		Проницаемость по газу, мД	Проницаемость по воде, мД	Пористость, %	Объем пор, см ³	Нач. нефтенасыщенность, д. ед.
	диаметр, мм	длина, мм					
2	30	250	1074	319	33,3	58,8	-

В ходе проведения эксперимента полимерный раствор пропускали через насыщенную минерализованной водой насыпную модель со скоростью закачки 1,0 м/сут при непрерывном отборе проб выходящей продукции. Концентрация полимера в пробах после прохождения пористой среды определялась фотометрическим методом в соответствии с методикой, предлагаемой в API RP 63 [5], по «методу отбеливания» с гипохлоритом натрия. Когда концентрация полимера в вышедшей продукции становилась равной исходной, закачка полимерного раствора прекращалась, и рассчитывалась предельная адсорбция полимера на пористой среде. Степень удержания полимера на породе (предельная

динамическая адсорбция) определялась по разности количества полимера, вошедшего и вышедшего из модели пласта.

На втором этапе эксперимента в модель пласта закачивалась вода до тех пор, пока в выходящей продукции содержание полимера не снижалось до следовых количеств. На этом закачка воды прекращалась, и рассчитывалась предельная десорбция полимера.

На рис. 3 представлен график зависимости концентрации полимера в выходящей из модели пористой среды продукции и градиента давления от объема прокачки раствора образца полимера №1 и минерализованной воды.

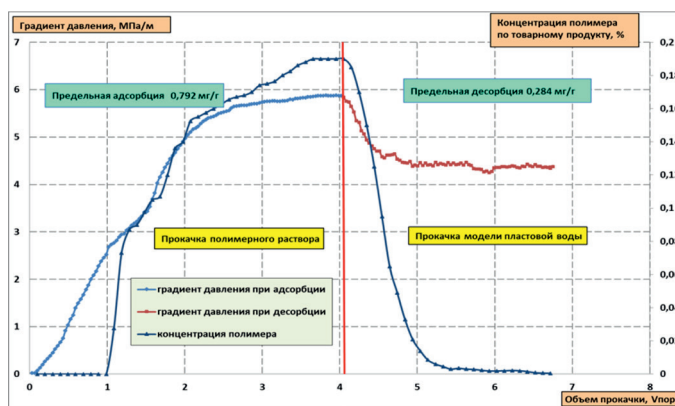


Рисунок 3. Зависимость концентрации полимера в выходящей из модели пористой среды продукции и градиента давления от объема прокачки раствора образца полимера №1 и минерализованной воды

Как видно из рис. 3, начало выхода полимера наблюдалось при прокачке более $1,0 V_{\text{пор}}$ полимерного раствора, в последующих пробах концентрация полимера возрастала, и при достижении объема прокачки, равного $3,75 V_{\text{пор}}$, концентрация полимера в вышедшей продукции равнялась исходной. На этом закачка полимерного раствора прекращалась, и рассчитывалась предельная адсорбция полимера на пористой среде, которая составила $0,792 \text{ мг/г}$. Следует отметить, что процесс закачки полимерного раствора характеризовался равномерным повышением градиента давления (до $5,8 \text{ МПа}$).

На втором этапе эксперимента при прокачке в модель пласта $0,3 V_{\text{пор}}$ минерализованной воды в отобранных пробах наблюдалось резкое снижение концентрации полимера. При достижении объема прокачки воды, равного $1,6 V_{\text{пор}}$, содержание полимера в вышедших пробах составляло менее $0,002\%$. Дополнительно было прокачено $1,2 V_{\text{пор}}$ модели пластовой воды, при этом на выходе в пробах наблюдались следы полимера. На этом закачка воды была прекращена, и рассчитывалась предельная десорбция полимера, которая составила $0,284 \text{ мг/г}$. Процесс закачки пластовой воды характеризовался понижением градиента давления с $5,8 \text{ МПа}$ со стабилизацией в районе $4,3 \text{ МПа}$.

Для полимерного раствора на основе образца №14 предельная адсорбция на породе составила $0,8606 \text{ мг/г}$, предельная десорбция полимера на породе – $0,4557 \text{ мг/г}$; для полимерного раствора на основе образца №9 адсорбция на породе составила $1,56 \text{ мг/г}$, что свидетельствует о его высокой адсорбционной способности. В связи с тем, что при прокачке более $7,5 V_{\text{пор}}$ полимерного раствора через насыпную модель пласта не была достигнута предельная адсорбция, а сам процесс закачки полимерного раствора характеризовался нестабильностью давления и концентрации полимера на выходе из модели, эксперимент по исследованию десорбции для данного образца не проводился, т.к. показатель десорбции в данном случае может быть некорректным.

Далее на насыпных моделях пласта были проведены фильтрационные эксперименты по определению коэффициента вытеснения нефти ($K_{\text{выт.}}$) водными растворами полимера на основе образцов №1, 9 и 14. На первом этапе эксперимента для вытеснения нефти использовалась модель пластовой воды, после проводилась закачка оторочки полимерного раствора.

Для проведения эксперимента по определению коэффициента вытеснения нефти водным раствором образца №1 использовалась насыпная модель со следующими параметрами (табл. 4).

Таблица 4. Параметры модели пористой среды, используемой в эксперименте по исследованию процесса вытеснения нефти полимерным раствором

№ модели	Размеры модели		Проницаемость по газу, мД	Проницаемость по воде, мД	Пористость, %	Объем пор, см ³	Нач. нефтенасыщенность, д. ед.
	диаметр, мм	длина, мм					
3	30	250	1030	317	29,7	52,5	39,4

На рис. 4 представлен график зависимости коэффициента вытеснения, обводненности и градиента давления от объема прокачки модели пластовой воды и полимерного раствора образца №1.

Как видно из рис. 4, прорыв воды наблюдался при прокачке $0,18 V_{\text{пор}}$ воды, после чего наблюдалось резкое увеличение обводненности продукции: при достижении объема прокачки, равного $0,69 V_{\text{пор}}$, она составила $97,5\%$. Обводненность 100% была достигнута при суммарной прокачке $2,52 V_{\text{пор}}$ воды. В ходе проведения заводнения наблюдался рост Квыт. до $0,502 \text{ д. ед.}$ и снижение градиента давления с $0,1876 \text{ до } 0,0316 \text{ МПа/м}$. Чтобы удостовериться в завершении

процесса вытеснения нефти водой, было дополнительно прокачено $0,64 V_{\text{пор}}$ модели минерализованной воды, при этом выхода дополнительной нефти не происходило.

На втором этапе эксперимента в модель пласта была закачена оторочка водного раствора образца полимера №1 концентрацией $0,19\% \text{ масс.}$ по товарному веществу в количестве $0,3 V_{\text{пор}}$ с последующим возобновлением прокачки модели пластовой воды. Этот процесс характеризовался неравномерным повышением градиента давления (от $0,03 \text{ до } 1,09 \text{ МПа/м}$), начавшимся при закачке полимера и наблюдавшимся практически до полного прекращения выхода нефти, и одновременным

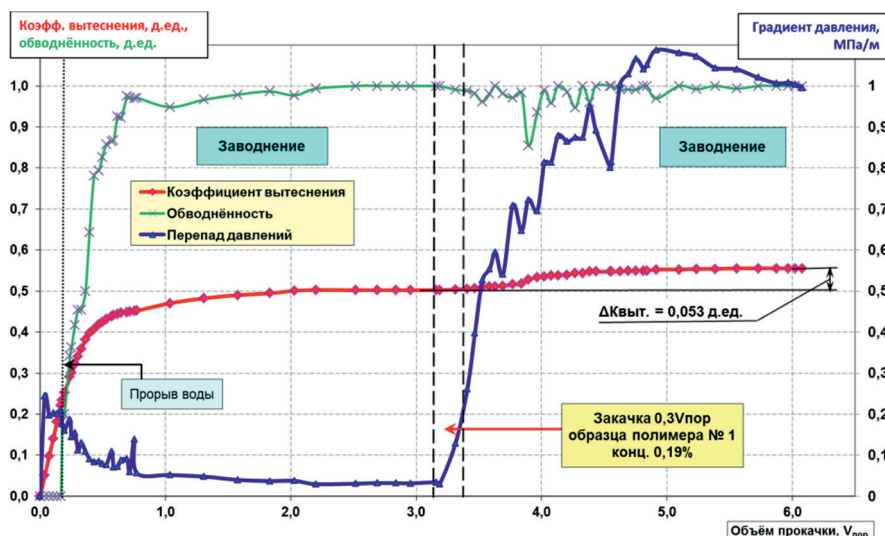


Рисунок 4. Зависимость коэффициента вытеснения, обводненности и градиента давления от объема прокачки модели пластовой воды и полимерного раствора образца №1

изменением обводненности от 85,4 до 96,9%, также происходившим неравномерно за счет перераспределения в пористой среде закачанного полимера. На завершающей стадии эксперимента отмечено незначительное снижение градиента давления (от 1,09 до 1,01 МПа/м) на фоне практически полного прекращения выхода нефти. Обводненность выходящей продукции составила более 99%, что связано, очевидно, с промывом канала в модели. Прирост коэффициента вытеснения ($\Delta K_{\text{выт.}}$) за счет прокачки оторочки раствора образца полимера №1 относительно заводнения составил 0,053 д. ед.

Аналогичным образом были проведены эксперименты с растворами

образцов полимеров №9 (коэффициент вытеснения нефти водой составил 0,502 д. ед. при суммарном объеме прокачки воды 3,13 $V_{\text{пор}}$; прирост коэффициента вытеснения за счет прокачки оторочки раствора полимера относительно заводнения составил 0,012 д. ед.) и №14 (коэффициент вытеснения нефти водой составил 0,502 д. ед. при суммарном объеме прокачки воды 3,15 $V_{\text{пор}}$; прирост коэффициента вытеснения за счет прокачки оторочки раствора полимера относительно заводнения составил 0,033 д. ед.).

Сравнительные характеристики растворов на основе трех выбранных образцов полимера приведены в табл. 5.

Таблица 5. Характеристики растворов на основе образцов полимера

№	Характеристики	№ образца ПАА		
		1	9	14
1	Оптимальная концентрация ПАА для достижения вязкости 70 мПа*с, % масс. по товарному продукту	0,19	0,15	0,15
2	Фильтруемость 0,15% раствора полимера, ед.	5,2*	7,6	10,2
3	Динамическая адсорбция (предельная) полимера, мг/г	0,792	1,56	0,861
4	Десорбция полимера, мг/г	0,284	-**	0,456
5	Коэффициент довытеснения нефти полимерным раствором, ($\Delta K_{\text{выт.}}$) д. ед.	0,053	0,012	0,033

* – раствор с концентрацией ПАА 0,19% масс. по товарному продукту

** - при прокачке полимерного раствора через насыпную модель пласта наблюдалась нестабильность давления и концентрации полимера на выходе из модели

Выводы

1. Все исследуемые марки полимера, кроме ПАА №5, полностью растворимы в пластовой воде с минерализацией 16 г/л.
2. Для получения полимерных растворов с вязкостью равной 70 мПа*с в пластовых условиях рекомендуется использовать концентрации 0,15% масс. ПАА №9 и 14 и 0,19% масс. ПАА №1.
3. Наиболее низкая фильтруемость наблюдается у раствора ПАА №1.
4. Определена предельная адсорбция/десорбция полимеров:
 - ПАА №1 – 0,792/0,284 мг/г;
 - ПАА №9 – 1,56/нет данных мг/г;
 - ПАА №14 – 0,861/0,456 мг/г.
5. Прирост коэффициента вытеснения относительно заводнения ($\Delta K_{\text{выт.}}$) за счет прокачки оторочки раствора полимера составил:
 - ПАА №1 – 0,053 д. ед.;
 - ПАА №9 – 0,012 д. ед.;
 - ПАА №14 – 0,033 д. ед.

Таким образом, по результатам проведенных физико-химических и фильтрационных экспериментов наилучшими показателями характеризуется образец полимера №1.

Список использованной литературы

1. Берлин А.В. Физико-химические методы повышения нефтеотдачи. Полимерное воздействие (обзор). Часть II. Изучение эффективности полимерного воздействия. – Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть», 2011.
2. Бурдынь Т.А., Горбунов А.Т., Лютин Л.В. и др. Методы увеличения нефтеотдачи пластов при заводнении. – М., Недра, 1973, с. 192.
3. Методики тестирования химических реагентов для обработки призабойной зоны пласта добывающих и нагнетательных скважин. Стандарт предприятия ОАО «ВНИИнефть». – М., ОАО «ВНИИнефть», 2013, с. 33.
4. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. Стандарт предприятия ОАО «ВНИИнефть». – М., ОАО «ВНИИнефть», 2013, с. 26.
5. API RP 63, Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations. STANDARD by American Petroleum Institute, 1 edition, 06/01/1990, p. 95.

БАТЫС СІБІР КЕН ОРНЫНДА ПОЛИМЕРЛІ СУЛАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЕНГІЗУ ҮШІН ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕР КЕШЕНІ НЕГІЗІНДЕ ПОЛИМЕРДІҢ ОҢТАЙЛЫ МАРКАСЫН ТАҢДАУ

Т.С. Рогова, Ю.Э. Ивина, С.В. Макарашин

Жұмыстың мақсаты Батыс Сібір кен орнының нақты геологиялық және физикалық жағдайларында полимерлі суландыруды жүзеге асыру үшін оңтайлы реагентті таңдау болды. Ол үшін айдалатын судағы полимерлердің ерігіштігі және олардың реологиялық қасиеттері қабаттық температурада полимердің ығысу жылдамдығы мен концентрациясына байланысты зерттелді, кеуекті орта бетіндегі полимерлердің динамикалық адсорбциясы және полимерлі ерітінділермен мұнайдың ығысуына дейінгі коэффициенті анықталды. Бұл жұмыстар «ВНИИнефть» АҚ-да әзірленген «кәсіпорын стандартына» сәйкес орындалды. Физикалық-химиялық және фильтрациялық эксперименттерінің нәтижелері бойынша ең жақсы көрсеткіштермен сипатталатын полимер үлгісі таңдалды. Бұл үлгіні Батыс Сібір кен орнында полимерлі суландыру технологиясын енгізу үшін ұсынуға болады.

Түйінді сөздер: полимерлі суландыру, полиакриламид, ерігіштігі, динамикалық тұтқырлығы, сүзгіштік, адсорбциясы, десорбциясы, ығысу коэффициенті.

SELECTION OF THE OPTIMAL POLYMER BRAND BASED ON A COMPLEX OF LABORATORY RESEARCHES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE POLYMER FILLING TECHNOLOGY AT THE WESTERN SIBERIA FIELD

T.S. Rogova, Y.E. Ivina, S.V. Makarshin

The aim of the work was to select the optimal reagent for the implementation of polymer flooding in the specific geological and physical conditions of the West Siberian field. For this, the solubility of polymers in the injected water and their rheological properties were studied depending on the shear rate and polymer concentration at reservoir temperature, the dynamic adsorption of polymers on the surface of the porous medium and the coefficient of additional oil displacement with polymer solutions were determined. These works were carried out in accordance with the «Enterprise Standard» developed by JSC «VNIIneft». Based on the results of the physicochemical and filtration experiments, a polymer sample with the best performance was selected. This sample can be recommended for the implementation of polymer flooding technology in the Western Siberia field.

Key words: polymer flooding, polyacrylamide, solubility, dynamic viscosity, filterability, adsorption, desorption, displacement efficiency.

Информация об авторах

Рогова Татьяна Сергеевна – канд. техн. наук, заместитель директора, trogova@vniineft.ru

Ивина Юлия Эдуардовна – главный специалист, yivina@vniineft.ru

Макарашин Сергей Валентинович – канд. хим. наук, руководитель направления, smakarshin@vniineft.ru

АО «ВНИИнефть», г. Москва, Россия.