ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ РЯДА АКРИЛАМИДА НА СВОЙСТВА СШИТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ

STUDY OF THE INFLUENCE OF MOLECULAR CHARACTERISTICS OF POLYMERS OF THE ACRYLAMIDE SERIES ON THE PROPERTIES OF CROSS-LINKED POLYMER SYSTEMS

Г. З. Калимуллина
Gulnara Z. Kalimullina

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

И. М. Ганиев
Ilgiz M. Ganiev

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

Опережающая выработка нефти из высокопродуктивных пластов и ввод новых месторождений преимущественно с трудноизвлекаемыми запасами в течение последних десятилетий в России ведет к непрерывному ухудшению качественного состояния нефтесырьевой базы. Как следствие, такая тенденция сопровождается осложнением применяемых методов разработки и технологий для достижения проектной нефтеотдачи — основного показателя эффективного использования сырьевой базы нефтедобычи. Повысить величину извлекаемых запасов и добычу нефти возможно за счет реализации таких технологий, как методы увеличения нефтеотдачи, а обеспечение эффективности их промышленного внедрения является важной и актуальной задачей, решение которой невозможно представить без выбора наиболее оптимальных методов, технологий и составов. В отечественной практике наибольшее распространение получили так называемые потокоотклоняющие технологии, а обзор технологий показал, что одной из наиболее часто используемых технологий, с высокой универсальностью действия, является технология сшитых полимерных составов на основе полимеров ряда акриламида. Поэтому вопрос выбора полимеров для их применения в технологиях повышения нефтеотдачи является достаточно актуальной задачей. В этой связи в статье изучен вопрос влияния молекулярных характеристик на свойства полимеров и сшитых полимерных систем, образованных на их основе. Для обоснованного выбора полимеров был проведен комплекс лабораторных исследований, включающий тестирование 9 марок полимеров акриламида с различными характеристиками и их трехмерно сшитых форм. На первом этапе определены следующие характеристики исходных полимеров: молекулярная масса, степень гидролиза, время и полнота растворения в среде модельной пластовой воды. На втором этапе проводились реовискосиметрические исследования линейных растворов полимеров, также были изучены сшиваемость, время сшивки в трехмерный гель ацетатом хрома. В результате проведенных исследований было показано, что путем варьирования полимеров акриламида с определенными молекулярными характеристиками существует возможность подбора оптимального состава гелеобразующей композиции.

The rapid production of oil from highly productive reservoirs and the introduction of new fields, mainly with hard-to-recover reserves, over the past decades in Russia has led to a continuous deterioration in the quality of the oil and gas base. As a result, this trend is accompanied by a complication of the development methods and technologies used to

Ключевые слова

методы увеличения нефтеотдачи;
повышение нефтеотдачи пластов;
потокоотклоняющие технологии;
сшитые полимерные системы
полимеры акриламида

Keywords

enhanced oil recovery;
flow diversion technologies;
crosslinked polymer systems;
acrylamide polymers

achieve project oil recovery – the main indicator of the effective use of the raw material base of oil production. It is possible to increase the amount of recoverable reserves and oil production through the implementation of such technologies as enhanced oil recovery methods, and ensuring the effectiveness of their industrial implementation is an important and urgent task, the solution of which is impossible to imagine without choosing the most optimal methods, technologies and compositions. In domestic practice, the most widespread are the so-called flow-diversion technologies, and a review of the technologies showed that one of the most commonly used technologies, with high versatility of action, is the technology of cross-linked polymer compositions based on polymers of the acrylamide series. Therefore, the issue of choosing polymers for their application in enhanced oil recovery technologies is quite an urgent task. In this regard, the article examines the influence of molecular characteristics on the properties of polymers and cross-linked polymer systems formed on their basis. For a reasonable choice of polymers, a complex of laboratory studies was carried out, including testing of 9 brands of acrylamide polymers with different characteristics and their three-dimensional cross-linked shapes. At the first stage, the following characteristics of the initial polymers were determined: molecular weight, degree of hydrolysis, time and completeness of dissolution in the medium of model reservoir water. At the second stage, reoviscosimetric studies of linear polymer solutions were carried out, and crosslinking and crosslinking time in a three-dimensional gel with chromium acetate were also studied. As a result of the conducted studies, it was shown that by varying the acrylamide polymers with certain molecular characteristics, it is possible to select the optimal composition of the gel-forming composition.

Введение

Текущее состояние разработки большинства нефтяных месторождений характеризуется ухудшением структуры остаточных запасов, что связано с переходом на поздние стадии разработки. В то же время основная часть вводимых в разработку новых месторождений относится к месторождениям с трудноизвлекаемыми запасами. В связи с этим постоянно повышаются требования в части применения как новых эффективных методов нефтеизвлечения, так и третичных методов увеличения нефтеотдачи, в частности физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (ФХ МУН), направленных на увеличение коэффициента охвата пласта процессом вытеснения и ограничение доли попутно-добываемой воды. В отечественной практике наибольшее распространение получили так называемые потокоотклоняющие технологии (ПОТ) — методы, направленные на блокирование каналов низкого фильтрационного сопротивления путем закачки в пласт сравнительно небольших объемов химических реагентов [1–5]. Обзор ПОТ, широко применяемых для повышения охвата продуктивного пласта заводнением [1, 2], показал, что одной из наиболее часто используемых технологий с высокой универсальностью действия является технология сшитых полимерных составов

(СПС) на основе полимеров ряда акриламида (ПАА). К несомненным достоинствам этой технологии следует отнести:

- гомогенность составов, отсутствие дисперсных компонентов и минимальные риски необратимого тампонажа зон воздействия;
- легкое управление вязкостными и прочностными характеристиками образующихся гелей, а также возможностью их размещения на различном расстоянии от нагнетательной скважины путем применения различных рецептур и композиций;
- сухая товарная форма полимера, которая имеет высокую степень разбавления до рабочей концентрации, что дает значительное преимущество с точки зрения транспортной логистики по сравнению с рядом других технологий.

В работе [6] рассмотрено применение технологий СПС в суровых пластовых условиях, а в работе [7] показано на примере двух полимеров влияние молекулярной массы на их вязкость. В целом, согласно выводам в работе [8], трехмерно сшитые гели на основе ПАА являются универсальными водоизолирующими составами для потокоотклоняющих технологий и характеризуются высокой технологичностью с точки зрения дизайнера при различных маршрутах продвижения закачиваемой воды.

В настоящее время на рынке существует значительное разнообразие ПАА, которые различаются молекулярной массой (ММ), степенью гидролиза (СГ) и вязкостными характеристиками. Поэтому вопрос выбора полимеров для их применения в технологиях повышения нефтеотдачи является достаточно актуальной задачей. В данной работе проведено изучение влияния молекулярных характеристик ПАА на свойства образующихся из них СПС.

Экспериментальная часть

В качестве растворителя для проведения исследований использовалась модель пластовой воды с общей минерализацией 15 г/л, которая готовилась путем растворения расчетного количества хлористого натрия и хлористого кальция в дистиллированной воде (80 % от общего количества солей составляет NaCl (хч), а 20 % — CaCl₂ (хч).

Молекулярная масса ПАА рассчитывалась по экспериментальным значениям характеристической вязкости $[\eta]$ полимера [9, 10] по уравнению Марка-Хаувинка-Куна:

$$[\eta] - KM^{\alpha}, \quad (1)$$

где $[\eta]$ — характеристическая вязкость;

M — молекулярная масса;

K и α — константы для системы «полимер — растворитель» при определенной температуре.

Величина α связана с гибкостью цепей и характеризует форму макромолекул в растворе. Для исследуемой нами системы «ПАА — буферный раствор» константа K равна $3,73 \cdot 10^{-4}$; константа $\alpha = 0,66$.

Характеристическая вязкость растворов полимеров определялась с использованием капиллярного вискозиметра Уббелюде (ВПЖ-1) с диаметром капилляра 0,99 мм.

Определение степени гидролиза образцов ПАА проводилось по следующей методике [11, 12]. Готовили 50 мл 0,25 %-го раствора ПАА в дистиллированной воде, затем разбавляли его дистиллированной водой до 200 мл, доводили pH до 3,8 с помощью 0,1 М раствора соляной кислоты HCl. Полученный раствор титровали 0,05 М раствором едкого натра NaOH до pH = 7,5.

Степень гидролиза ПАА (α) рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{(V - V_0) \cdot N \cdot 71 \cdot 10^{-3}}{P - (V - V_0) \cdot N \cdot 23 \cdot 10^{-3}} \cdot 100, \quad (2)$$

где V и V_0 — объемы раствора NaOH, затраченные на титрование в рабочем и холостом опытах соответственно, мл;

P — навеска ПАА, г;

N — концентрация раствора NaOH, моль/л.

Тест на сшиваемость в трехмерный гель и определение времени гелеобразования проводили для составов, содержащих 0,3 % масс. ПАА в модельной воде минерализацией 15 г/л. В качестве сшивающего агента был использован ацетат хрома Cr(CH₃COO)₃, который широко используется благодаря возможности гибкого регулирования времени гелеобразования, доступности и хорошей растворимости в воде. В полимерных гелеобразующих композициях соотношение концентраций полимера и сшивателя составляло 10 : 1 как наиболее оптимальное по многочисленным предыдущим исследованиям. При таком соотношении исходных компонентов степень сшивки по карбоксильным группам близка к 100 %. Методика приготовления растворов была следующая: в свежеприготовленный раствор полимера в модельной воде после полного растворения ПАА при медленном перемешивании вводили расчетное количество товарного ацетата хрома. Сшивка проводилась в стационарном состоянии при температуре 60 °С. Время гелеобразования определяли по времени жизни нити (время релаксации) с помощью релаксометра конструкции ИПНГ РАН. При достижении значений времени релаксации больше 100 с ($\tau_{\text{рел.}} \rightarrow \infty$) полимерная система считается достигшей необходимой степени сшивки.

Реовискозиметрическое тестирование 0,3 % растворов предоставленных образцов ПАА и СПС на их основе проводились на реометре MARS (фирма Haake, Германия) с использованием воспринимающих элементов «цилиндр-цилиндр» и применении сдвигового теста при изменении градиента скорости сдвига в диапазоне от 0,1 до 300 с⁻¹.

Результаты и их обсуждение

Для исследований были выбраны 9 марок ПАА, для которых проведены лабораторные тесты по определению следующих характеристик:

- молекулярная масса;
- степень гидролиза;
- время растворения в модели пластовой воды;
- время гелеобразования;
- вязкостные свойства растворов исходных ПАА и СПС на их основе.

Определение молекулярной массы и степени гидролиза

Для оценки технологических свойств ПАА на первом этапе были определены молекулярная масса и степень гидролиза исследуемых химических реагентов. Молекулярная масса полимера является одной из основных характеристик ПАА, определяющих его физико-химические свойства. При выборе ПАА наибольшее предпочтение следует отдавать об-

разцам с большой молекулярной массой, поскольку их цепочки обладают более высокими вязкостными характеристиками. В таблице 1 приведены полученные в лабораторных исследованиях значения молекулярной массы исследованных полимеров в сравнении с данными изготовителя.

Как видно, значения молекулярной массы протестированных ПАА, определенные в лаборатории, практически совпадают с данными

Таблица 1. Свойства ПАА различных марок

Марка	Молекулярная масса, млн у.е.		Степень гидролиза, % моль		Время растворения, мин	Время сшивки, мин*
	Данные производителя	Экспериментальные данные	Данные производителя	Экспериментальные данные		
ПАА-1	6,6	6,9	8,8	8,5	110–120	180
ПАА-2	8,2	9,0	27,0	26,9	110–120	158
ПАА-3	11,1	11,3	33,9	34,3	110–120	85
ПАА-4	11,1	11,9	8,6	9,1	150–180	90
ПАА-5	13,4	13,7	23,5	24,5	150–180	60
ПАА-6	14,7	14,2	30,6	30,8	150–180	60
ПАА-7	16,4	15,9	13,2	12,8	180–210	55
ПАА-8	17,1	16,7	22,0	23,4	180–210	50
ПАА-9	19,7	19,4	30,1	31,2	180–210	40

Примечание

* — время сшивки (гелеобразования) представлено для составов с содержанием 0,3 % масс. ПАА и 0,03 % масс. ацетата хрома.

Изготовителя. Следующей важнейшей характеристикой ПАА является степень гидролиза. Содержание карбоксильных групп в ПАА предопределяет проявление ими анионных свойств и полиэлектролитных эффектов, влияющих на весь комплекс технологических свойств растворов, таких как растворимость и совместимость полимеров с высокоминерализованными водами, стойкость к различным видам деструкции, способность к трехмерному сшиванию ионами металлов переменной валентности с образованием вязкоупругих составов (ВУС), фильтрационные, реологические и адсорбционные свойства. Полученные значения степени гидролиза в сравнении с данными производителя реагентов представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, выбранные для исследования марки ПАА характеризуются как широким диапазоном молекулярных масс, так и широким диапазоном степени гидролиза.

Определение времени растворения

Одним из наиболее важных параметров, определяющих технологичность ПАА, является время растворения в используемой минерализованной воде, что весьма важно для эффективного приготовления раствора в про-

мысловых условиях. Минерализация используемой воды имеет существенное значение, поскольку взаимодействие полимера с растворителем определяет конформацию полимера в растворе и сказывается на вязкостных свойствах полимера. В общем случае, чем меньше минерализация, тем более гидратированы и развернуты макромолекулы ПАА и выше вязкость раствора. Полученные данные по растворимости образцов ПАА в модельной пластовой воде приведены в таблице 1. Как видно, наблюдается зависимость времени растворения марок ПАА от значения их молекулярной массы: низко- и среднемолекулярные образцы растворились за 2–3 ч, что соответствует требованиям, применяемым к полимерам в нефтедобыче. Высокомолекулярные образцы растворились за 3–3,5 ч, что несколько превышает норматив, но, в целом, практически соответствует требованиям технологии по времени растворения. При этом отмечается, что время растворения полимеров одинаковой молекулярной массы меньше у образца, имеющего более высокую степень гидролиза. Так, марка ПАА-3, в которой доля карбоксильных групп по данным производителя составляет 33,9 %, растворяется за 110 мин. ПАА-4, сте-

пень гидролиза которого составляет 8,6 %, растворяется уже за 165 мин. Таким образом, скорость растворения ПАА в условиях данного эксперимента напрямую зависит от молекулярных характеристик. Чем выше молекулярный вес полимера, тем больше времени требуется на его растворение. При одинаковых значениях молекулярной массы время растворения ниже у образца с более высокой степенью гидролиза.

На рисунке 1 показана растворимость образцов ПАА различной степени гидролиза, которая указана для каждого образца ПАА в процентах.

Вязкостные свойства линейных, не сшитых, 0,3 %-ых растворов ПАА приведены на рисунке 2. Как видно, реологические свойства протестированных ПАА зависят от их молекулярной массы, степени гидролиза и от приложенной деформации (скорости сдвига). Наиболее существенно влияет на вязкость растворов молекулярная масса полимера. Наиболее высоковязкими являются растворы высокомолекулярных ПАА, наименее вязкими — растворы низкомолекулярных ПАА.

Влияние степени гидролиза полимера существенно проявляется среди высокомолеку-

Рисунок 1. Зависимость времени растворения различных марок ПАА от молекулярной массы и степени гидролиза

Рисунок 2. Зависимость эффективной вязкости 0,3 %-ых растворов ПАА различной молекулярной массы и степени гидролиза от скорости сдвига

лярных образцов ПАА и со снижением значений степени гидролиза на каждые 8–9 % происходит заметное снижение эффективной вязкости. Для средне- и низкомолекулярных полимеров значительная разница в реологических свойствах наблюдается лишь при разнице степеней гидролиза в 22–25 %.

Все растворы проявляют неньютоновское поведение, то есть при увеличении скорости сдвига происходит изменение вязкости. Причем, для растворов высокомолекулярных образцов ПАА (13,4–19,7 млн у.е.) неньютоновский характер течения более выражен. В области малых скоростей они имеют наибольшие значения эффективной вязкости — в пределах от 0,001 до 0,15 Па·с. С увеличением приложенной деформации происходит резкое снижение вязкостных свойств. Для композиций на основе низкомолекулярных полимеров снижение вязкости при увеличении деформации не столь существенное.

Время гелеобразования — это период, за который система приобретает необходимую пространственную структуру и комплекс реологических и фильтрационных характеристик. Данный параметр зависит от марок полимера и сшивателя, их концентраций и соотношения, пластовой температуры, минерализации воды. Результаты проведенного тестирования по определению времени образования гелей СПС в условиях эксперимента

приведены в таблице 1. По полученным результатам четко видно, что на время образования геля существенное влияние оказывает значение молекулярной массы ПАА — с ее ростом уменьшается время сшивки состава. Например, для серии полимеров ПАА-2, ПАА-5, ПАА-8, имеющих примерно одинаковую степень гидролиза, низкомолекулярный ПАА-2 образует гель за 158 мин, а высокомолекулярный ПАА-8 — уже за 50 мин. Аналогичная зависимость наблюдается и при сравнении ПАА других серий.

Также следует отметить, что с увеличением степени гидролиза в каждой отдельной группе полимеров (как для высоко-, так и для средне- и низкомолекулярных ПАА) требуется меньше времени для образования геля. Причем, наиболее значительная разница во времени гелеобразования наблюдается в группе низкомолекулярных марок полимеров — ПАА-1, ПАА-2, ПАА-3.

На рисунке 3 приведены кинетические кривые, характеризующие скорость процесса гелеобразования на основе протестированных составов.

Как видно, процесс гелеобразования проходит с индукционным периодом, продолжительность которого тем выше, чем ниже молекулярная масса ПАА. В этот период происходит появление микрогелевых частиц, что характери-

Рисунок 3. Кинетика процесса гелеобразования при 60 °С составов на основе 0,3 %-ых растворов ПАА и 0,03 % ацетата хрома

зуется медленным нарастанием времени «жизни» нити. Затем происходит укрупнение этих микрогелевых частиц с увеличением времени релаксации и с последующим формированием структуры геля во всем объеме.

Результаты реовискосиметрического тестирования СПС на основе 0,3 % масс. ПАА и 0,03 % масс. ацетата хрома, сшивка которых произведена при 60 °С, показывают, что вязкостные свойства СПС значительно увеличиваются в сравнении с исходными растворами полимеров.

Сравнение кривых для составов на основе отдельных групп (низко-, средне- и высокомолекулярных ПАА), представленных на ри-

сунке 4, показывает, что наибольшей вязкостью обладают СПС, приготовленные на основе высокомолекулярных образцов ПАА.

Также отмечается влияние степени гидролиза исходных ПАА на реовязкостные свойства получаемых гелей СПС как внутри каждой отдельной группы, так и при сравнении их между собой. Внутри каждой группы ПАА (низко-, средне- и высокомолекулярных ПАА) с увеличением степени гидролиза во всем диапазоне измерения увеличиваются и значения эффективной вязкости сшитых составов, хотя и в разной степени. Наиболее значительное приращение вязкости с повышением степени гидролиза наблюдается в группе низко-, затем средне- и вы-

Рисунок 4. Зависимость реовязкостных свойств СПС на основе ПАА различной молекулярной массы и степени гидролиза от скорости сдвига (температура замеров — 23 °С)

Рисунок 5. Зависимость эффективной вязкости СПС при скорости сдвига 0,041 с⁻¹ от молекулярных характеристик полимеров (температура замеров — 23 °С)

сокомолекулярных полимеров. То есть, содержание карбоксильных групп оказывает более существенное влияние на свойства получаемых гелей на основе низкомолекулярных ПАА.

При достижении содержания карбоксильных групп 30 % и выше вязкостные свойства СПС на основе всех трёх групп ПАА, независимо от молекулярной массы, являются наиболее высоковязкими и становятся сравнимыми между собой.

Для более наглядной демонстрации влияния молекулярных характеристик на вязкостные свойства СПС на рисунке 5 приведены зависимости их эффективной вязкости при скорости сдвига $0,04144 \text{ с}^{-1}$ от молекулярной массы, где для каждого образца отмечены численные значения степеней гидролиза в процентах.

Как видно из рисунка 5, более существенное влияние на количественные показатели вязкости оказывает молекулярная масса. Так, при практически одинаковой степени гидролиза двух образцов (30,1% и 30,6%) вязкость СПС на основе ПАА с большей молекулярной массой (19,7 млн у.е.) превышает вязкость геля на основе полимера с меньшей молекулярной массой (14,7 млн у.е.). Изменение степени гидролиза также вносит существенную коррекцию в реологические свойства. При одинаковой молекулярной массе ПАА-3 и ПАА-4 (11,1 млн у.е.) значительно более вязким является образец, имеющий более высокую степень гидролиза, то есть содержащий больше карбоксильных групп. Таким образом, вязкостные свойства получаемых гелей СПС зависят как от молекулярной массы и степени гидролиза исходных полимеров по отдельности, так и от их совокупности.

Таким образом, в результате проведения исследований выявлено, что молекулярные харак-

теристики влияют на скорость растворения ПАА, на время гелеобразования и на реологические характеристики исходных полимеров и СПС на их основе. Установлено, что чем выше молекулярная масса полимера, тем больше времени требуется на его растворение. При одинаковых значениях молекулярной массы время растворения ниже у образцов с более высокой степенью гидролиза. Также показано, что чем выше молекулярная масса, тем выше скорость гелеобразования. С увеличением степени гидролиза в каждой отдельной группе полимеров (как для высоко-, так и для средне- и низкомолекулярных ПАА) также сокращается время для образования геля. Причем, наиболее значительная разница во времени гелеобразования наблюдается в группе низкомолекулярных марок полиакриламидов. Также выявлено, что наиболее существенно на вязкость как исходных растворов полимеров, так и на образующихся СПС на их основе влияет молекулярная масса ПАА: чем выше молекулярный вес ПАА, тем выше вязкость растворов. Влияние степени гидролиза полимера существенно проявляется среди высокомолекулярных образцов ПАА, и со снижением её значений на каждые 8–9 % происходит заметное снижение эффективной вязкости. Для средне- и низкомолекулярных полимеров значительное изменение в реологических свойствах отмечено лишь при разнице значений степеней гидролиза в 22–25 %. Таким образом, путем варьирования образцов ПАА с определенными молекулярными характеристиками существует возможность выбора оптимальной марки полимера и оптимального состава гелеобразующей композиции для конкретных объектов с различными геолого-физическими условиями.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газизов А.А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. М.: Недра, 2002. 638 с.
2. Shandrygin A.N., Lutfullin A. Main Trends In the Development of Enhanced Reservoir Coverage by Stimulation in Russia // Russian Oil and Gas Technical: Materials of SPE Conference and Exhibition. Moscow, Russia. 2008. SPE-117410-MS. DOI: 10.2118/117410-MS.
3. Ганиев И.М., Яковлев К.В., Белых А.М., Исмагилов Т.А. Об особенностях применения потокоотклоняющих технологий на поздних стадиях разработки трещиноватых карбонатных коллекторов // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 3. С. 51–60. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-51-60.
4. Белых А.М., Перевошиков Д.О., Ганиев И.М., Исмагилов Т.А. Инновационный подход к применению физико-химических методов увеличения нефтеотдачи

на карбонатных коллекторах месторождений ОАО «Удмуртнефть» // Территория «Нефтегаз». 2018. № 6. С. 36–50.

5. Белых А.М., Перевошиков Д.О., Ганиев И.М., Исмагилов Т.А. Совершенствование потокоотклоняющих технологий на основе полимерных систем для карбонатных коллекторов ОАО «Удмуртнефть» // Инженерная практика. 2016. № 7. С. 22–27.

6. Wanli Kang, Xin Kang, Zeeshan Ali Lashari, Zhe Li, Bobo Zhou, Hongbin Yang, Bauyrzhan Sarsenbekuly, Saule Aidarova Progress of Polymer Gels for Conformance Control in Oilfield // Advances in Colloid and Interface Science. 2021. Vol. 289. P. 112–125. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102363.

7. Мухаматдинов И.И., Соса Акоста А., Алиев Ф.А., Ахмадияров А.А., Долгих С.А. Исследование влияния минеральных солей на реологические свойства растворов полимеров применительно к месторождению Санта-Круз (Куба) // Нефтяное хозяйство. 2021. № 1. С. 48–51. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-48-51.

8. Исмагилов Т.А. Применение потокоотклоняющих технологий с учетом механизма обводнения продукции скважин // Нефтяное хозяйство. 2015. № 11. С. 56–59.

9. Зубов В.П., Лачинов М.Б., Шибяев В.П. Практикум по высокомолекулярным соединениям. М.: Химия, 1985. 223 с.

10. Осовская И.И., Антонова В.С. Вязкость растворов полимеров. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 62 с.

11. Байбурдов Т.А., Шиповская А.Б. Синтез, химические и физико-химические свойства полимеров акриламида. Саратов: Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 2014. 66 с.

12. А.С. 1778280 СССР, МПК Е 21 В 43/22. Способ разработки неоднородного нефтяного пласта / А.Ш. Газизов, И.Г. Нигматуллин, И.Ф. Ефремов, А.Ш. Сыртланов, Э.Г. Гирфанов. 4798603, Заявлено 05.03.1990; Опубл. 30.11.1992.

REFERENCES

1. Gazizov A.A. *Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdnei stadii razrabotki* [Increase in Oil Output of Heterogeneous Layers at the Last Development Stage]. Moscow, Nedra Publ., 2002. 638 p. [in Russian].

2. Shandrygin A.N., Lutfullin A. Main Trends in the Development of Enhanced Reservoir Coverage by Stimulation in Russia. *Materials of SPE Conference and Exhibition «Russian Oil and Gas Technical»*. Moscow, Russia, 2008, SPE-117410-MS. DOI: 10.2118/117410-MS.

3. Ganiev I.M., Yakovlev K.V., Belykh A.M., Ismagilov T.A. Ob osobennostyakh primeneniya potokootklonyayushchikh tekhnologii na pozdnykh stadiyakh razrabotki treshchinovatykh karbonatnykh kollektorov [On Specifics of Using Flow Redirection Technologies at Late Stages of Fractured Carbonate Reservoirs Development]. *Neftgazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 51–60. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-51-60. [in Russian].

4. Belykh A.M., Perevoshchikov D.O., Ganiev I.M., Ismagilov T.A. Innovatsionnyi podkhod k primeniyu fiziko-khimicheskikh metodov uvelicheniya nefteotdachi na karbonatnykh kollektorakh mestorozhdeniiy OAO «Udmurtneft» [Innovative Approach to the Application of Physicochemical Enhanced Oil Recovery in Carbonate Reservoirs of Udmurtneft OJSC Fields]. *Territoriya «Neftgaz» — Oil and Gas Territory*, 2018, No. 6, pp. 36–50. [in Russian].

5. Belykh A.M., Perevoshchikov D.O., Ganiev I.M., Ismagilov T.A. Sovershenstvovanie potokootklonyayushchikh tekhnologii na osnove polimernykh sistem dlya karbonatnykh kollektorov OAO «Udmurtneft» [Improvement of Flow Diverting Technologies Based on Polymer Systems for Carbonate Reservoirs of Udmurtneft OJSC]. *Inzhenernaya praktika – Engineering Practice*, 2016, No. 7, pp. 22–27. [in Russian].

6. Wanli Kang, Xin Kang, Zeeshan Ali Lashari, Zhe Li, Bobo Zhou, Hongbin Yang, Bauyrzhan Sarsenbekuly, Saule Aidarova Progress of Polymer Gels for Conformance Control in Oilfield. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, Vol. 289, pp. 112–125. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102363.

7. Mukhamatdinov I.I., Sosa Akosta A., Aliev F.A., Akhmediyarov A.A., Dolgikh S.A. Issledovanie vliyaniya mineral'nykh solei na reologicheskie svoystva rastvorov polimerov primenitel'no k mestorozhdeniyu Santa-Kruz (Kuba) [The Effects of Mineral Salts on the Rheology of Polymer Solutions in Case of Santa Cruze Reservoir (Cuba)]. *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2021, No. 1, pp. 48–51. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-48-51. [in Russian].

8. Ismagilov T.A. Primenenie potokootklonyayushchikh tekhnologii s uchedom mekhanizma obvodneniya produktsii skvazhin [Application of Water Control Technologies, Considering the Mechanisms of Injected Water Breakthrough]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2015, No. 11, pp. 56–59. [in Russian].

9. Zubov V.P., Lachinov M.B., Shibaev V.P. *Praktikum po vysokomolekulyarnym soedineniyam* [Workshop on High Molecular Weight Compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 223 p. [in Russian].

10. Osovskaya I.I., Antonova V.S. *Vyazkost' rastvorov polimerov* [Viscosity of Polymer Solutions]. St. Petersburg, VShTE SPbGUPTD Publ., 2016. 62 p. [in Russian].

11. Baiburdiv T.A., Shipovskaya A.B. *Sintez, khimicheskie i fiziko-khimicheskie svoystva polimerov akrilamida* [Synthesis, Chemical and Physicochemical Properties of Acrylamide Polymers]. Saratov, Saratovskii gosudarstvennyi universitet im. N.G. Chernyshevskogo Publ., 2014. 66 p. [in Russian].

12. Gazizov A.Sh., Nigmatullin I.G., Efremov I.F., Syrtlanov A.Sh., Girfanov E.G. *Sposob razrabotki neodnorodnogo neftyanogo plasta* [Method for Developing a Heterogeneous Oil Reservoir]. Patent RF, No. 1778280, 1992. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Калимуллина Гульнара Зинятулловна, главный специалист лаборатории физико-химических исследований, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Gulnara Z. Kalimullina, Chief Specialist of the Physical and Chemical Research Laboratory, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: KalimullinaGZ@bnipi.rosneft.ru

Ганиев Ильгиз Маратович, канд. хим. наук, начальник отдела разработки и внедрения методов повышения нефтеотдачи пластов, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Ilgiz M. Ganiev, Candidate of Chemical Sciences, Head of the Development and Implementation of EOR Methods Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: Ganievim@bnipi.rosneft.ru