

## **Исследование устойчивости дисперсных систем для физико-химических методов увеличения нефтеотдачи в присутствии гидрофобного наполнителя**

**С. Ф. Мамбетов<sup>1\*</sup>, Ю. В. Земцов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

\*Sergey.Mambetov@lukoil.com

*Аннотация.* В процессе закачки воды для вытеснения нефти наблюдаются ее прорывы по наиболее высокопроницаемым зонам коллектора. Ограничение движения нефтевытесняющего агента в этом случае является одним из главных условий дальнейшей эффективной разработки залежи и повышения эффективности применяемых методов воздействия на пласт. Достигнуть этого можно путем целенаправленного тампонирувания физико-химическими составами высокопроводящих каналов и техногенных трещин. В большинстве случаев происходит перераспределение потоков и, как следствие, подключение в работу ранее не дренируемых интервалов пластов.

Эффект тампонирувания наилучшим способом достигается за счет использования дисперсных систем, в состав которых входят различные наполнители. Формирование качественного водоизоляционного барьера при использовании подобных технологий зависит от стабильности рабочего состава.

Работа посвящена изучению гидрофобизированного наполнителя, представляющего собой, согласно техническим условиям изготовителя, гидрофобизированный, не набухающий в воде нефтяной сорбент. В работе рассмотрены условия седиментационной и агрегативной устойчивости дисперсных систем на основе данного наполнителя.

Экспериментально показано, что на седиментационную устойчивость систем влияют гидрофобные свойства наполнителя, которые не позволяют частицам впитывать водную фазу, набухать и выпадать в осадок. Опытным путем показано, что системы, в состав которых входят натрий-карбоксиметилцеллюлоза (NaКМЦ) или полиакриламид (ПАА) PetroPam P-104, обладают схожими показателями по периоду начала массового осаждения частиц, их средним расчетным скоростям осаждения, а также вязкостным характеристикам.

*Ключевые слова:* высокодисперсный наполнитель, агрегативная и седиментационная устойчивость, гидрофобность частиц, вязкостные характеристики

*Для цитирования:* Мамбетов, С. Ф. Исследование устойчивости дисперсных систем для физико-химических методов увеличения нефтеотдачи в присутствии гидрофобного наполнителя / С. Ф. Мамбетов, Ю. В. Земцов. – DOI 10.31660/0445-0108-2023-4-42-51 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 4. – С. 42–51.

## **Stability studies of dispersed systems for physicochemical methods to enhance oil recovery in the presence of a hydrophobic filler**

**Sergey F. Mambetov<sup>1\*</sup>, Yuri V. Zemtsov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*KogalymNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC, Tyumen, Russia*

<sup>2</sup>*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

*\*Sergey.Mambetov@lukoil.com*

**Abstract.** As the formation of highly permeable zones in the reservoir results in progressive watering of the produced products, restricting the movement of the oil displacement agent is one of the main conditions for further improving the effectiveness of methods for influencing oil-saturated formations. This can be achieved by targeted tamponing with physicochemical compositions of highly conductive channels and artificial fractures. In most cases, there is a redistribution of flow and, as a result, previously undrained reservoir intervals are brought into production.

The effect of tamponing is best achieved by the use of dispersed systems containing various fillers. The use of such technologies is regulated in many documents used in the work of oil and gas producing enterprises. The formation of a high-quality water barrier in such technologies depends on the stability of the working composition.

The article is devoted to the study of the influence of filler hydrophobicity on the sedimentation and aggregation stability of dispersed systems. The conditions under which the systems show the least tendency to sedimentation and are aggregatively unstable are considered. It has been shown experimentally that the stability of the systems is influenced by the hydrophobic properties of the filler, which do not allow the particles to enter the aqueous phase, swell and precipitate, thereby reducing the sedimentation stability. It has been shown experimentally that the systems composed of NaQMC or PetroPam P-104 have similar indicators for the time of onset of mass deposition of particles, their average calculated deposition rates as well as viscosity characteristics.

**Keywords:** highly dispersed filler, aggregation and sedimentation stability, particle hydrophobicity, viscosity characteristics

**For citation:** Mambetov, S. F., & Zemtsov, Yu. V. (2023). Stability studies of dispersed systems for physicochemical methods to enhance oil recovery in the presence of a hydrophobic filler. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 42-51. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2023-4-42-51

## **Введение**

Продуктивные пласты нефтегазовых месторождений во время разработки претерпевают всесторонние изменения, влияющие на многие характеристики и свойства горных пород, наиболее значимой из которых является проницаемость. Увеличение проницаемости коллектора по воде при вытеснении ею углеводородной фазы и соответствующее снижение проницаемости для углеводородов отрицательно сказывается на их добыче [1].

Общеизвестно, что при вытеснении нефти водой вслед за извлекаемой углеводородной фазой в поровое пространство поступает вода, которая имеет иную природу происхождения и по своим физико-химическим свойствам значительно отличается от нефти. Присутствие водной фазы приводит к изменению коллекторских характеристик пластов — внутри пласта, в результате метаморфических изменений, образуются участки с менее проницаемым коллектором с остаточной нефтью. Происходит закономерное перераспределение фильтрационных потоков нагнетаемого агента, вода фильтруется по наиболее проницаемым прослоям. Менее проницаемые зоны остаются в стороне от основных миграционных потоков. И если

на первых этапах разработки на эти процессы можно повлиять, используя широкий спектр физико-химических методов увеличения нефтеотдачи, то на заключительных стадиях их эффективность становится недостаточной, так как неизвлеченная нефть остается в наиболее труднодоступных, удаленных от забоев скважин участках [2–5]. Для того чтобы вовлечь в фильтрационные потоки нефть из подобных зон, требуются методы и материалы, обладающие специфическими свойствами. Нами выдвинута гипотеза, что такие специфические свойства вытесняющим составам может придать гидрофобность частиц наполнителя дисперсных систем. Еще одним важным моментом является то, что за счет нахождения частиц дисперсного наполнителя во взвешенном состоянии внутри объема несущего агента, их проникающая способность увеличивается, что позволяет воздействовать на наиболее удаленные участки с остаточными запасами. Помимо этого, сорбционные свойства гидрофобного наполнителя по отношению к углеводородной фазе будут способствовать аккумуляции капиллярно связанной пленочной нефти на поверхности олеофильных частиц наполнителя — будут создаваться предпосылки для образования капель свободной нефти.

#### **Объект и методы исследования**

Известно, что дисперсные системы по сравнению с истинными растворами отличаются термодинамической неустойчивостью и склонностью к самопроизвольному уменьшению со временем своей степени дисперсности, а значит, и числа частиц дисперсной фазы в единице объема. Основной причиной возникновения указанных процессов является смачиваемость частиц, их слипание друг с другом в большие агрегаты, которые за счет сил тяжести начинают постепенно оседать на дно раствора. Данный процесс называется коагуляцией. Чем медленнее протекает коагуляция, тем более седиментационно устойчивой считается дисперсная система<sup>1</sup>.

Седиментационная устойчивость может быть обеспечена, если выполнены несколько условий:

- размеры дисперсных частиц очень малы;
- вязкость дисперсной среды достаточна для стабильности удержания частиц в растворе;
- разность плотностей вещества дисперсной среды и дисперсной фазы небольшая;
- температура раствора обеспечивает седиментационную устойчивость системы.

Минимизация размера дисперсных частиц достигается за счет измельчения наполнителя. Выбирается такая размерность частиц, при которой разность в плотности минимальна. Для достижения требуемой вязко-

---

<sup>1</sup> Файловый архив студентов StudFiles: сайт. – URL: <https://studfile.net> (дата обращения: 15.03.2023).

сти используют полимерные компоненты. Повышение температуры задерживает осаждение частиц, однако способствует их слипанию.

### **Экспериментальная часть**

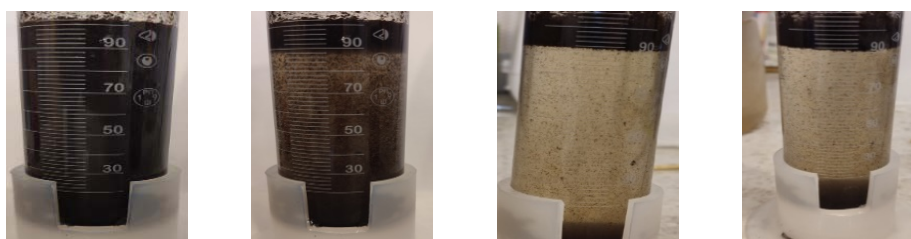
Для того чтобы частицы наполнителя равномерно распределялись во всем объеме раствора, необходимо минимизировать процессы слипания между ними, то есть обеспечить агрегативную устойчивость рабочего раствора. Нами предположено, что этого можно достичь, придав дисперсным частицам гидрофобные свойства.

Для подтверждения данной гипотезы были проведены исследования по определению устойчивости полимер-дисперсных систем с участием гидрофобного наполнителя.

Гидрофобный наполнитель, выбранный для исследований, представляет собой органическое мелкодисперсное вещество — сорбент, в состав которого входят гуминовые вещества, битумы, легкогидролизуемые углеводы, неорганические компоненты. Сорбент, за счет приданных ему гидрофобных свойств, не растворяется в воде, не впитывает ее и не набухает.

С целью подтверждения выдвинутой гипотезы на начальном этапе исследований были проведены предварительные тесты на испытание положительного влияния гидрофобности наполнителя в дисперсных составах для увеличения нефтеотдачи. В опытах использована фракция наполнителя, размер частиц которого не превышал 0,4 мм, массовая доля этих частиц составляла 70 % от общей массы наполнителя.

В мерные цилиндры наливали 100 мл подтоварной воды и добавляли навеску фракции наполнителя  $m = 2$  г, затем тщательно смешивали до полной гомогенизации системы. После этого оставляли в покое и визуально оценивали внешний вид полученной суспензии и характер распределения частиц в объеме (рис. 1).



После смешения

Через 5 мин

Через 60 мин

Через 24 часа

**Рис. 1. Внешний вид дисперсной системы  
«подтоварная вода — гидрофобный наполнитель»**

Было определено, что после добавления наполнителя в подтоварную воду большинство частиц остается в ее толще у поверхности. Это означает, что гидрофобные частицы не набухают в воде, не увеличиваются в весе и

не тонут. Лишь небольшая часть оседает или находится во взвешенном состоянии. Отмечается затухающая беспорядочная миграция отдельных частиц наполнителя по всему объему суспензии. Это означает отсутствие их слипания между собой, а в целом — агрегативную устойчивость системы.

1. Через 5 минут после смешения на поверхности или во взвешенном состоянии находится 70–80 % от общего объема наполнителя, в осадке — до 20 %. На дне замечена легкодеформируемая взвесь, частицы которой при взбалтывании поднимаются вверх и перемещаются по всему объему. Вверху граница фаз четкая, цвет воды меняется от прозрачного к темному сверху вниз. В нижней части суспензии четкая граница фаз отсутствует.

2. Через 30 минут наблюдается миграция частиц по всему объему. Распределение частей: 80 % — на поверхности, 20 % — легкая взвесь на дне. Происходит осветление средней части объема. При взбалтывании осадок легко выходит из равновесного состояния.

3. Через 60 минут характер распределения без изменений: 80 % на 20 %. Происходит постепенное осветление средней части объема. Число мигрирующих в объеме частиц уменьшается.

4. Далее, при наблюдении в течение трех суток характер распределения частиц в объеме оставался неизменным. Это показывает седиментационную и агрегативную устойчивость состава. При приготовлении и закачке такого состава в скважину и пласт дисперсные частицы не будут слипаться или выпадать в осадок, и во взвешенном состоянии будут доставлены в удаленную от забоя скважины зону пласта.

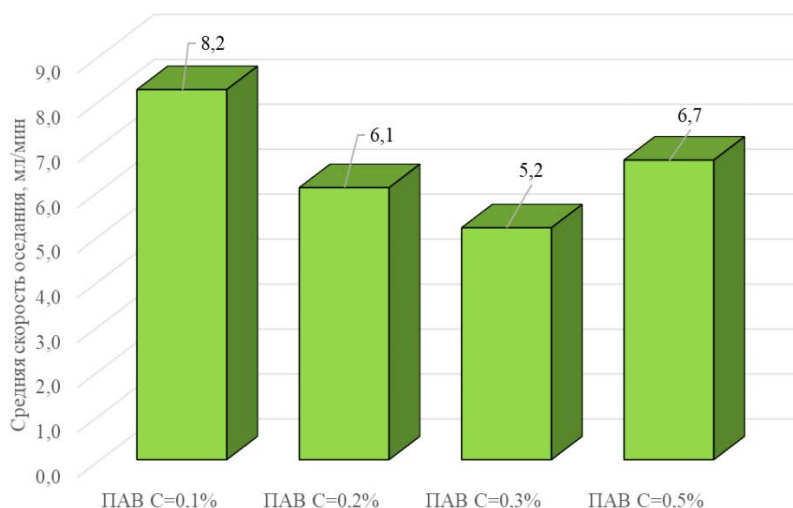
Для того чтобы определить степень влияния поверхностно-активных веществ на устойчивость экспериментальных систем, провели ряд исследований с участием неионогенного поверхностно-активного вещества «Неонол АФ<sub>9-12</sub>» (далее НПАВ): концентраций  $C = 0,1 \%$ ,  $C = 0,2 \%$ ,  $C = 0,3 \%$  и  $C = 0,5 \%$ . Свежеприготовленные системы «подтоварная вода — гидрофобный наполнитель — НПАВ» помещали в градуированные мерные цилиндры и при комнатной температуре осуществляли наблюдения за изменением внешнего вида. Экспозицию проводили в течение 30 мин, определяли отношение объемов осветляемой части составов к объему частиц, выпадающих в осадок.

В процессе наблюдений было зафиксировано, что скорость оседания частиц наполнителя для различных концентраций НПАВ является разной, а характер распределения частиц остается неизменным. На поверхности остается плавать не более 7–8 % наполнителя, основная доля частиц ( $\approx 70 \%$ ) начинает оседать, остальная часть ( $\approx 20 \%$ ) находится во взвешенном состоянии и медленно перемещается по всему объему суспензии в различных направлениях. Осадок представляет собой легкодеформируемую взвесь, которая при незначительном волнении выходит из равновесного состояния, частицы легко поднимаются вверх и начинают мигрировать по всему объему, постепенно оседая на дно.

Условная скорость оседания частиц наполнителя определялась визуально по времени осветления дисперсного состава и рассчитывалась по отношению объема светлой фазы ко времени на определенном этапе проведения эксперимента:

$$V = \text{Объем} / \text{Время} \quad (1)$$

На рисунке 2 приведены средние расчетные значения скорости оседания в зависимости от концентрации НПАВ в экспериментальных системах.



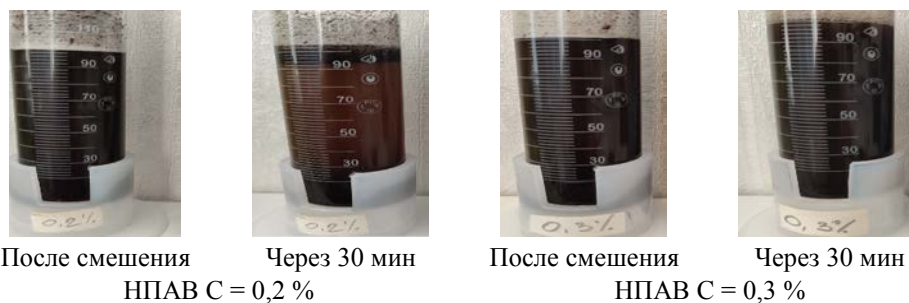
**Рис. 2. Средняя расчетная скорость оседания частиц гидрофобного наполнителя при различном содержании НПАВ**

Как видно из рисунка, наименьшей скоростью оседания обладают системы с содержанием НПАВ  $C = 0,2 \%$  и  $C = 0,3 \%$ . Средняя расчетная скорость оседания составляет 6,1 и 5,2 мл/мин. Необходимо отметить, что полученные данные носят условный характер, не являются абсолютными значениями и предназначены для сравнительной оценки стабильности системы.

Учитывая тот факт, что устойчивость дисперсных систем зависит от степени дисперсности частиц, были проведены исследования с использованием высокодисперсной фракции наполнителя, размер частиц которых не превышал 0,2 мм. Концентрацию НПАВ использовали с учетом ранее проведенных испытаний, наиболее оптимальными оказались  $C = 0,2 \%$  и  $C = 0,3 \%$ .

Процесс проведения экспериментов был аналогичен ранее проведенным. Компоненты системы смешивались, и состав переливался в градуированный цилиндр для дальнейшей экспозиции при комнатной температуре. Сразу после окончания смешения частицы равномерно распределились по всему объему составов. Однако по истечении 30 минут характер рас-

пределения частиц для разных концентраций поменялся. Если для раствора НПАВ  $C = 0,2 \%$  наблюдалось осветление средней фазы за счет всплытия основной части наполнителя на поверхность, то для  $C = 0,3 \%$  осветления не наблюдалось. Распределение частиц по всему объему оставалось постоянным, разделения фаз не происходило, частицы находились во взвешенном состоянии, скопления на дне не обнаруживались (рис. 3).



**Рис. 3. Внешний вид систем «подтоварная вода — гидрофобный наполнитель — НПАВ». Эксперименты с высокодисперсной фракцией**

Расчет скорости оседания по аналогии с предыдущими исследованиями провести не удалось, так как явного осветления водной фазы не происходило.

Следующим этапом исследований было проведение экспериментов с добавлением в систему полимерной составляющей. В качестве полимеров были использованы ПАА марки PetroPam P-104 и натрий-карбоксиметилцеллюлоза NaКМЦ. Кроме этого, в рецептуры экспериментальных составов входили высокодисперсный гидрофобный наполнитель (ВДГН), НПАВ и подтоварная вода. Процесс проведения испытаний был идентичен ранее проведенным, но наблюдения проводили в течение 60 минут. Оценка седиментационной и агрегативной устойчивости экспериментальных составов проводилась визуально по изменению объема осветляемой фазы раствора, образованию осадка, консистенции приготовленного раствора и времени начала массового осаждения частиц наполнителя. Рецептуры составов отличались между собой по содержанию полимерной составляющей и НПАВ. Содержание гидрофобного наполнителя оставалось постоянным для всех экспериментов. Дополнительно были проведены замеры динамической вязкости при комнатной температуре на свежеприготовленных составах на вращательном вискозиметре OFITE с ручным приводом. Замеры проводили при фиксированной скорости вращения муфты ротора 600 об/мин.

### **Результаты и обсуждение**

Полученные результаты подтвердили возможность получения более устойчивой дисперсной системы при наличии в ней более мелких частиц

наполнителя. Более мелкая фракция имеет бóльшую удельную площадь поверхности, что положительно влияет на стабильность экспериментальной системы. Присутствие НПАВ с концентрацией  $C = 0,2-0,3$  % положительно повлияло на распределение наполнителя по всему объему системы. Дальнейшее увеличение концентрации НПАВ приводит к его адсорбции на поверхности и последующему образованию агломератов, состоящих из НПАВ и дисперсных частиц, которые стремятся в осадок. Значит, при повышении содержания НПАВ в составе более чем  $C = 0,3$  %, система становится менее агрегативно устойчивой.

В таблице приведены показатели времени начала массового осаждения, средней расчетной скорости осаждения частиц и динамической вязкости.

**Время начала массового осаждения частиц, расчетная скорость осаждения и динамическая вязкость экспериментальных составов**

Рецептура	Время начала массового осаждения частиц, мин	Средняя расчетная скорость осаждения, мл/мин	Динамическая вязкость, мПа·с
1 состав (NaКМЦ)	6	2,42	11,2
2 состав (NaКМЦ)	6	2,8	10,1
3 состав (NaКМЦ)	11	0,6	11,7
4 состав (ПАА)	17	0,7	13,4
5 состав (ПАА)	23	0,5	18,7
6 состав (ПАА)	40	0,30	19,8
7 состав (NaКМЦ)	> 60	0,07	12,4
8 состав (ПАА)	> 60	0,01	16,7

Как видно из таблицы, составы № 7, 8 имеют практически нулевую скорость осаждения, соответственно, на протяжении всего времени наблюдений начала массового осаждения частиц зафиксировано не было. Еще одна рецептура также имеет достаточно большой временной период до начала массового осаждения частиц — 40 минут.

Отмечается, что седиментационной и агрегативной устойчивостью обладают системы, в состав которых входит как NaКМЦ, так и ПАА, при этом наличие или отсутствие НПАВ не имеет преобладающего влияния на устойчивость экспериментальных систем.

Вязкостные характеристики рассматриваемых растворов находятся в одном диапазоне. Прямой и ощутимой взаимозависимости между ними и седиментационной устойчивостью полимер-дисперсных систем в исследованных концентрациях полимеров не отмечается.



## **Выводы**

1. Гидрофобные свойства частиц наполнителя не позволяют частицам впитывать воду, набухать, слипаться друг с другом. В итоге частицы находятся на поверхности воды или во взвешенном состоянии, что положительно влияет на агрегативную и седиментационную устойчивость полимер-дисперсных систем.

2. Более мелкая фракция наполнителя имеет бóльшую удельную площадь поверхности, что положительно влияет на стабильность исследованных систем.

3. Присутствие НПАВ в системе дает возможность равномерного распределения частиц внутри объема. Экспериментально определено что наиболее оптимальной концентрацией НПАВ является  $C = 0,2\% \dots 0,3\%$ .

4. Седиментационной и агрегативной устойчивости исследованных полимер-дисперсных систем возможно добиться вне зависимости от марки используемого полимера. Опытным путем показано, что системы, в состав которых входят полимеры различной природы NaКМЦ или Petro-Ram P-104, обладают схожими показателями по периоду начала массового осаждения частиц, их средним расчетным скоростям осаждения, а также вязкостным характеристикам.

5. Основной причиной выявленных свойств исследованных полимер-дисперсных растворов являются гидрофобные свойства частиц наполнителя.

## **Список источников**

1. Газизов, А. Ш. Решение практических задач управления заводнением пластов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений / А. Ш. Газизов. – Текст : непосредственный // Деп. Во ВНИИОЭНГе, 29.10.86, – № 1315-НГ. – 124 с.

2. Влияние технологий выравнивания профиля приемистости скважин на показатели разработки месторождений ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» / И. С. Джафаров, М. Ф. Нуриев, А. П. Рожков [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 12. – С. 33–36.

3. Алтунина, Л. К. Комплексная гель-технология ограничения водопритока с применением гелеобразующих систем / Л. К. Алтунина, В. А. Кувшинов. – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2003. – № 10. – С. 20-23.

4. Газизов, А. Ш. Повышение нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки месторождений с применением полимердисперсных систем и других химреагентов / А. Ш. Газизов, Л. А. Галактионова, А. А. Газизов. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело. – 1995. – № 2–3. – С. 29–34.

5. Ситуллин, Ю. Б. Результаты применения потокоотклоняющих технологий увеличения нефтеотдачи при извлечении слабодренлируемых запасов нефти на месторождениях мамонтовской группы ООО «РН-Юганскнефтегаз» / Ю. Б. Ситуллин, В. В. Мазаев. – Текст : непосредственный // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО — Югры : сборник докладов XI научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск, 2008. – Т. 2. – С. 373–382.

## References

1. Gazizov, A. Sh. (1986). Reshenie prakticheskikh zadach upravleniya zavodnemi plastov na pozdney stadii razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy. Dep. Vo VNIIO-ENGe, 29.10.86, No 1315-NG, 124 p. (In Russian).
2. Dzhafarov, I. S., Nuriev, M. F., Rozhkov, A. P., Strizhnev, K. V., & Kovaleva, A. A. (2009). The influence of technology of wells injectivity profile alignment on the performance of Gazpromneft-Noyabrskneftegaz OJSC fields development. Oil Industry, (12), pp. 33-36. (In Russian).
3. Altunina, L. K., & Kuvshinov, V. A. (2003). Kompleksnaya gel'tekhnologiya ogranicheniya vodopritoka s primeneniem geleobrazuyushchikh system. Burenie i neft', (10), pp. 20-23. (In Russian).
4. Gazizov, A. Sh., Galaktionova, L. A., & Gazizov, A. A. (1995). Povyshenie nefteotdachi plastov na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem polimerdispersnykh sistem i drugikh khimreagentov. Neftepromyslovoe delo, (2-3), pp. 29-34. (In Russian).
5. Situllin, Yu. B., & Mazaev, V. V. (2008). Rezul'taty primeneniya potokootklonyayushchikh tekhnologiy uvelicheniya nefteotdachi pri izvlechenii slabodreniruemyykh zapasov nefti na mestorozhdeniyakh mamontovskoy gruppy OOO "RN-Yuganskneftegaz". Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala Khmao - Yugry : sbornik dokladov XI nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tom. 2. Khanty-Mansiysk, pp. 373-382. (In Russian).

## Информация об авторах

**Мамбетов Сергей Фанилович**, главный специалист отдела инженерного сопровождения опытно-промышленных работ, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Когалым-НИПИнефть», г. Тюмень, [Sergey.Mambetov@lukoil.com](mailto:Sergey.Mambetov@lukoil.com)

**Земцов Юрий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

## Information about the authors

**Sergey F. Mambetov**, Chief Specialist of the Department of Engineering Support of Experimental Industrial Works, KogalymNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC, Tyumen, [Sergey.Mambetov@lukoil.com](mailto:Sergey.Mambetov@lukoil.com)

**Yuri V. Zemtsov**, Doctor of Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 26.07.2023; принята к публикации 28.07.2023.

The article was submitted 11.05.2023; approved after reviewing 26.07.2023; accepted for publication 28.07.2023.