

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2025.1.204-226>

EDN THNUVY

УДК 622.276.61

## **Разработка седиментационно-устойчивого полимерного состава на основе промышленного отхода**

*Раупов И.Р., Сытник Ю.А., Ильин Д.В., Пягай И.Н., Зубакина М.А.*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,*

*Санкт-Петербург, Россия*

## **The design of the sedimentative polymer solution is based on industrial by-products**

*I.R. Raupov, J.A. Sytnik, D.V. Ilin, I.N. Pyagay, M.A. Zubakina*

*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*

**E-mail: [julia.andreevna.97@mail.ru](mailto:julia.andreevna.97@mail.ru)**

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты исследования седиментационной устойчивости полимер-дисперсных систем (ПДС) на основе полимеров акрилового ряда и отхода химической промышленности, разрабатываемых для регулирования фильтрационных потоков в неоднородных терригенных коллекторах и повышения коэффициента охвата заводнением. Целью работы является определение наиболее стабильной во времени полимер-дисперсной системы. В рамках экспериментов выполнены следующие задачи: перевод техногенного отхода в нетоксичный вид и измельчение до порошкообразного состояния; приготовление водных растворов полимеров акрилового ряда различных молекулярных масс и ионных зарядов; визуальный контроль приготовленных полимер-дисперсных систем на протяжении 24 часов видеофиксацией; анализ полученных результатов. По результатам эксперимента установлено, что наибольшей седиментационной устойчивостью обладают полимер-дисперсные системы на основе анионных полимеров с большей молекулярной массой. Однако раствор на основе полимера DP-9 с высокой молекулярной массой седиментационно нестабилен. Таким образом, седиментационная устойчивость зависит от совокупности свойств используемого полимера, а именно его молекулярной массы, типа и плотности заряда молекул.

**Ключевые слова:** *седиментационная устойчивость, полимерный раствор, коэффициент охвата заводнением, регулирование фильтрационных потоков, остаточные запасы, неньютоновская жидкость, каталитический шлам*

**Для цитирования:** Раупов И.Р., Сытник Ю.А., Ильин Д.В., Пягай И.Н., Зубакина М.А. Разработка седиментационно-устойчивого полимерного состава на основе промышленного отхода // Нефтяная провинция.-2025.-№1(41).-С. 204-226. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.1.204-226>. - EDN THNUVY

**Abstract.** This paper presents the results of the study of sedimentation stability of polymer-dispersed systems (PDS) based on acrylamide and chemical industry waste, developed to regulate filtration flows in heterogeneous terrigenous reservoirs and increase waterflood coverage ratio. The aim of the work is to determine the most stable polymer-disperse system in time. Within the framework of the experiments the following tasks were performed: conversion of technogenic waste into non-toxic form and grinding to powdery state; preparation of aqueous solutions of acrylic polymers of different molecular weights and ionic charges; visual control of the prepared polymer-disperse systems during 24 hours by video recording; analysis of the obtained results. From the experimental results, it was found that polymer-dispersed systems based on anionic polymers with higher molecular weight have the highest sedimentation stability. However, the solution based on DP-9 polymer with high molecular weight is not sedimentation stable. Thus, the sedimentation stability depends on the set of properties of the polymer used, namely its molecular weight, type and charge density of molecules.

**Key words:** *sedimentation stability, polymer solution, conformance factor, regulation of filtration flows, residual reserves, non-Newtonian fluid, catalytic slurry*

**For citation:** I.R. Raupov, J.A. Sytnik, D.V. Ilin, I.N. Pyagay, M.A. Zubakina Razrabotka sedimentacionno-ustojchivogo polimernogo so-stava na osnove promyshlennogo othoda [The design of the sedimentative polymer solution is based on industrial by-products]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(41), 2025. pp. 204-226. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.1.204-226>. EDN THNUVY (in Russian)

## Введение

Технологии повышения нефтеизвлечения с использованием полимерных растворов имеют широкое распространение в нефтяной промышленности [1–3]. Закачка в пласт полимерного раствора позволяет увеличить коэффициент извлечения нефти. Этот рост обусловлен увеличением коэффициента охвата пласта заводнением или уменьшением количества остаточной нефти в промытых зонах пласта за счет регулирования фильтрационных потоков полимерными композициями. Успешность потокоотклоняющей тех-

нологии (ПОТ) зависит от стабильности, прочности, проникающей и водоизолирующей способностей полимерных составов [4, 5]. В связи с этим, создание улучшенных рецептур остается по-прежнему актуальной задачей в вопросах эффективного заводнения нефтяных месторождений.

На сегодняшний день рынок химических реагентов переживает кризисное время. Центры поставок сырья для производства химических реагентов, в частности сшивателей для водоизоляционных составов, переориентировались в Азиатско-Тихоокеанский регион и ряд дружественных стран. Однако стоимость транспортировки сырьевых компонентов во многом превышает стоимость производимого продукта, что экономически осложняет проведение геолого-технических мероприятий.

Потенциальным решением проблемы удорожания химических реагентов является частичная или их полная замена на отходы промышленных предприятий, содержащие необходимые компоненты. Известно, что выбросы алюмохромовых шламов, содержащих в себе многовалентные катионы металлов, российских нефтехимических предприятий составляют 10000-12000 т/год. Кроме того, ежегодно в смету затрат нефтехимических предприятий входит утилизация указанного шлама, содержащего токсичный для человека и опасный для окружающей среды шестивалентный хром [6].

В данной работе предлагается утилизация указанного нейтрализованного шлама в качестве наполнителя и сшивателя макромолекул синтетического полимера. В качестве исследуемых реагентов рассматриваются растворы полимеров акрилового ряда: полиакриламида (ПАА), гидролизованного полиакрилонитрила (ГПАН), широко используемых в нефтегазовой промышленности, с содержанием отхода нефтехимической промышленности (далее – шлам), применяемого для повышения прочности и водоизолирующей способности ПДС. Таким образом, использование предварительно

очищенного от вредных примесей шлама позволит, с одной стороны, решить задачи по повышению эффективности потокоотклоняющей технологии, что приведет к снижению обводненности добываемой продукции и к увеличению коэффициента нефтеизвлечения, а с другой стороны, разработать недорогой способ утилизации шлама, что снизит экологическую и экономическую нагрузку на бюджет предприятий, перерабатывающих углеводородное сырье.

### **Материалы и методы**

В качестве объекта исследования были использованы полимер-дисперсные растворы различных марок полиакриламида: AN 934SH, С-494, АМС CR650, DP-9, PDA-1004, Poly-T 101, Flooram 3230, Flooram 3630, а также частично гидролизованый полиакрилонитрил (ГПАН) с добавлением каталитического шлама в нетоксичном состоянии, полученного по технологии [7]. Целевая концентрация полимеров в водном растворе составляла 10000 ppm, шлам добавлялся в раствор при соотношении к полимеру 1:1. Ионные заряды полимеров были взяты из их паспортов, молекулярные массы получены в работе [8], а массовая доля основного вещества определялась по методике [9]. Приготовление всех растворов осуществлялось лопастной мешалкой с верхним приводом при частоте перемешивания 300 об/мин в стандартных условиях. Предварительно готовят суспензию шлама, а затем вводят ее в полимерный раствор [10].

Для получения значения молекулярной массы полимера необходимо установить значение характеристической (внутренней) вязкости полимера  $[\eta]$ , которая в свою очередь является косвенным показателем молекулярной массы [11, 12]. Определение характеристической вязкости осуществлялось с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-2. Готовится серия растворов исследуемого полимера в 3%-ном водном растворе NaCl с концентрациями в диапазоне от 150 до 1000 ppm. После чего осуществля-

ется измерение кинематической вязкости согласно паспорту прибора ВПЖ - 2. По полученным значениям вязкости раствора полимера ( $\eta$ ) и вязкости растворителя ( $\eta_s$ ) рассчитываются значения удельной ( $\eta_{sp}$ ) и относительной ( $\eta_r$ ) вязкостей:

$$\eta_{sp} = (\eta/\eta_s) - 1 \quad (1)$$

$$\eta_r = \eta/\eta_s \quad (2)$$

Теперь необходимо построить зависимости  $\eta_{sp}/c$  и  $\ln(\eta_r)/c$  как функции от концентрации полимера. Полученные зависимости аппроксимируются линейной функцией и экстраполируются на значение концентрации равное нулю. Точка пересечения прямых с вертикальной осью покажет значение характеристической вязкости  $[\eta]$ . Затем по уравнению (3) определяется величина молекулярной массы.

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

где:

$K'$  и  $a$  – константы Марка-Хувинка, полученные для полимеров акрилового рада;

$M$  – молекулярная масса полимера.

Фракционирование шлама осуществлялось с помощью сит по ГОСТ 12536-2014, применяемых при ситовом анализе. Высушенная в печи навеска шлама высыпается на сито с размером ячеек 94 мкм. Далее с помощью вибросита осуществляется рассев навески на протяжении 10 минут. Фракция, прошедшая через сито, отбирается для дальнейших исследований. Разделение шлама на фракции производится для наблюдения поведения частиц шлама в полимер-дисперсной системе.

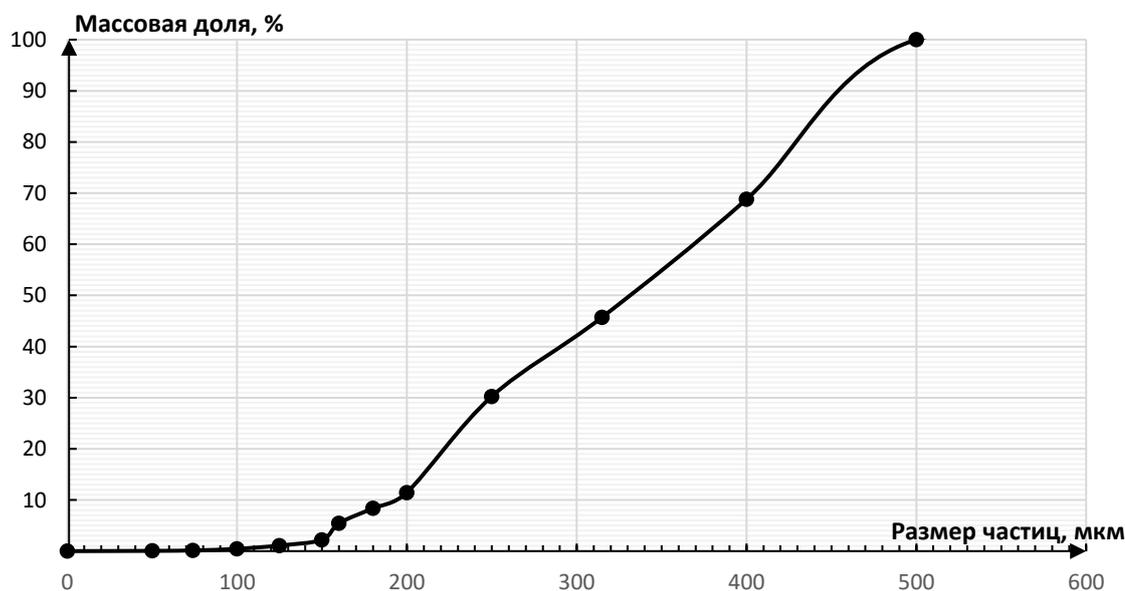
Перед приготовлением полимерной композиции необходимо осуществить подготовку шлама. Нужно просушить шлам, чтобы избежать загрязнения сит. Для этого навески шлама помещаются в печь при температуре 105°C на 5 часов. После отсева шлам помещается в емкости, ограничивающие контакт продукта с воздухом.

Седиментационная устойчивость полимерных составов определялась визуальным контролем с помощью видеофиксации на протяжении 24 часов после приготовления полимер-дисперсных составов (съемка осуществлялась в помещении с доступом дневного света, из-за чего на фотографиях заметно изменение освещения).

### Результаты исследований и обсуждения

Получены, в соответствии с описанной ранее методикой, значения молекулярных масс для каждого полимера: PDA-1004 –  $29,769 \cdot 10^6$  Да, Флораат 3630 –  $11,682 \cdot 10^6$  Да, ГПАН –  $8,991 \cdot 10^6$  Да, Флораат 3230 –  $8,204 \cdot 10^6$  Да, Poly-T 101 –  $6,148 \cdot 10^6$  Да, DP-9 –  $8,588 \cdot 10^6$  Да, AN 934SH –  $5,788 \cdot 10^6$  Да, С-494 –  $2,333 \cdot 10^6$  Да.

В результате проведения рассева навески исследуемого шлама получена фракция с размером частиц менее 94 мкм, которая будет использована для проведения эксперимента. Интегральная кривая гранулометрического состава шлама представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Гранулометрический состав шлама*

Важно соблюдать размеры используемых частиц при их фильтрации в поровое пространство [1]. Экспериментально установлено, что свободное

проникновение частиц в поровое пространство и их дальнейшее перемещение в нем осуществляется при условии, что диаметр пор ( $d_p$ ) в 10 раз превышает диаметр частиц ( $d_c$ ). При  $d_p < 3d_c$  проникновение отсутствует, при  $3d_c < d_p < 10d_c$  происходит кольматация пор [13]. В других исследованиях теоретически получено, что при закачивании дисперсных частиц твердых пород в пористые пласты нефтяных месторождений необходимо соблюдение условия:  $d_c < 0,33d_p$ , а для фильтрации частиц в пористой среде – условия:  $d_c < (0,4-0,7)d_p$  [14, 15].

В ходе проведения визуального анализа на протяжении 24 часов были определены наиболее седиментационно-устойчивые полимер-дисперсные составы. Результаты исследований представлены в табл. 1–9.

При взаимодействии ПАА АМС CR 650 со шламом образовались крупные хлопьевидные частицы, которые находятся во взвешенном состоянии на протяжении всего эксперимента (Табл. 1). Таким образом, данный полимерный состав обладает высокой седиментационной устойчивостью.

В ходе испытания составов на основе ПАА AN 934SH и ПАА DP-9 визуально заметно увеличение количества осадка. Незначительная часть шлама вступила в реакцию с полимером, о чем свидетельствует зеленый цвет состава (Табл. 2-3). Таким образом, данные полимеры обладают низкой седиментационной устойчивостью.

На протяжении всего эксперимента не происходит визуальных изменений в полимер-дисперсной системе на основе ПАА PDA-1004. Такой однородный состав полимерной композиции может говорить о том, что большая часть шлама вступила в реакцию с полимером и, скорее всего, произошел процесс структурообразования. Образовавшаяся структура препятствует оседанию взвешенных частиц шлама (Табл. 4). Данный полимерный состав можно отнести к составам с высокой седиментационной устойчивостью.

Таблица 1

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА АМС CR650**

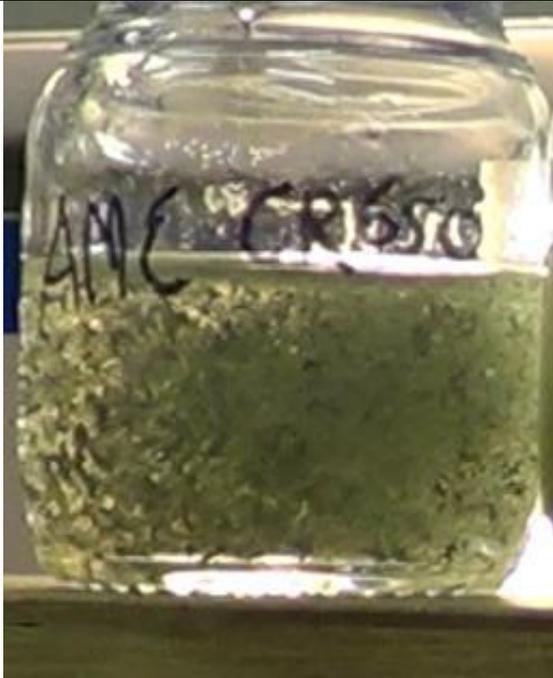
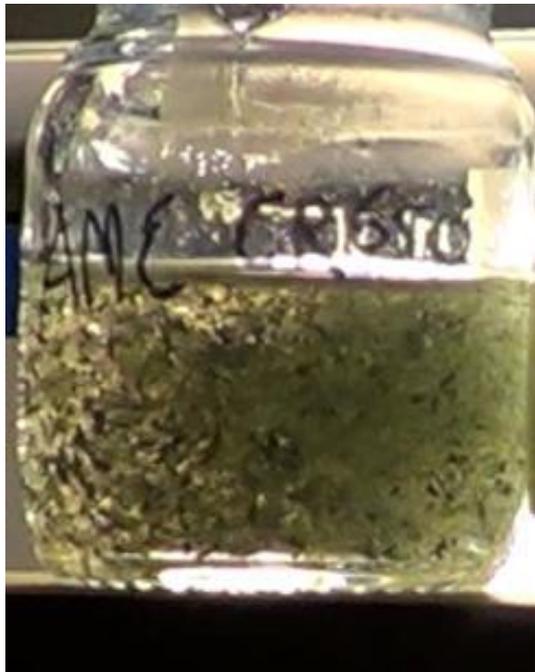
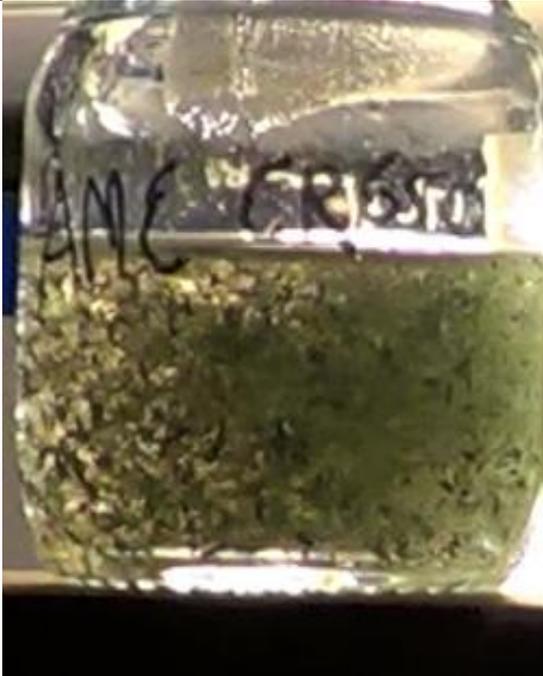
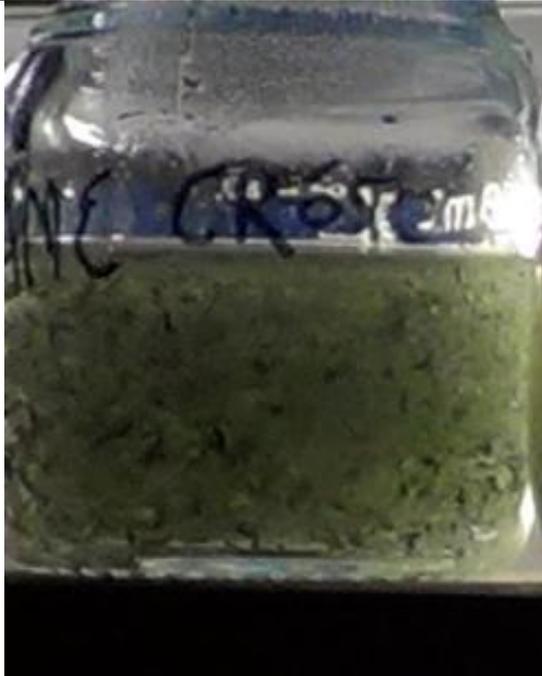
ПАА АМС CR650 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	высокая уст.
8 часов	24 часа
	
высокая уст.	высокая уст.

Таблица 2

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА AN 934SH**

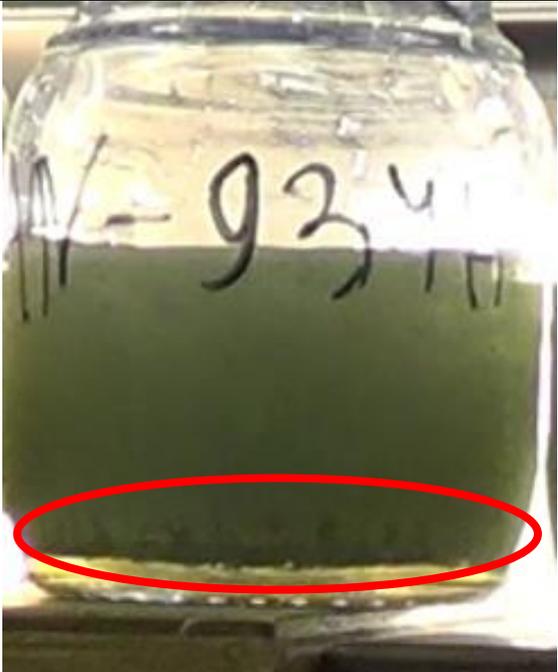
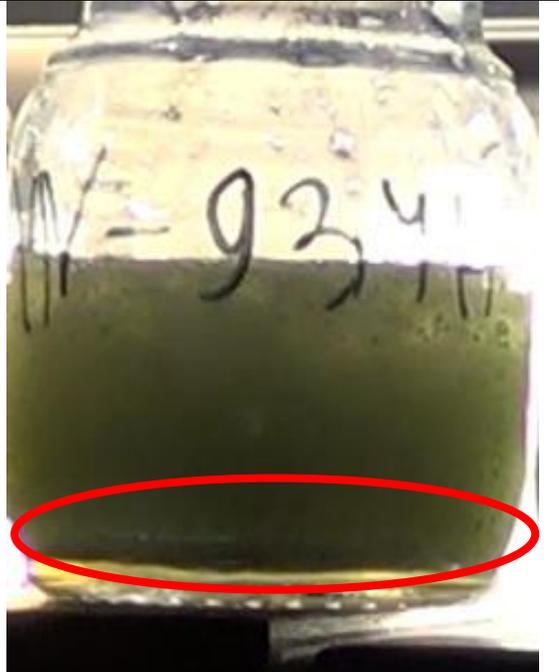
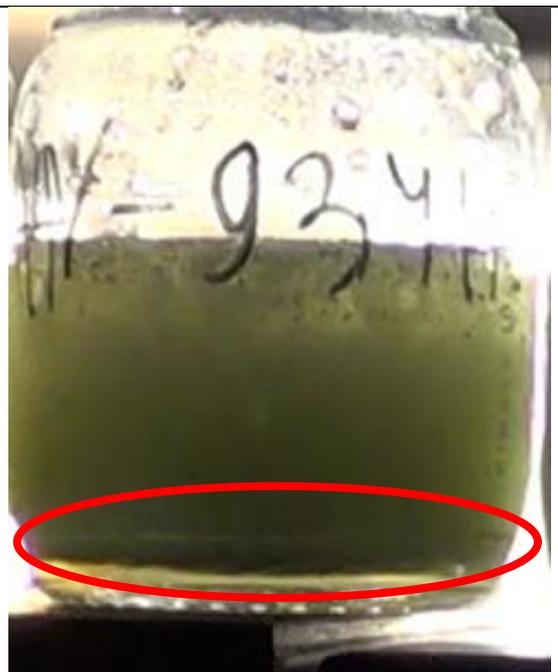
ПАА AN 934SH фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	средняя уст.
8 часов	24 часа
	
низкая уст.	низкая уст.

Таблица 3

*Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА DP-9*

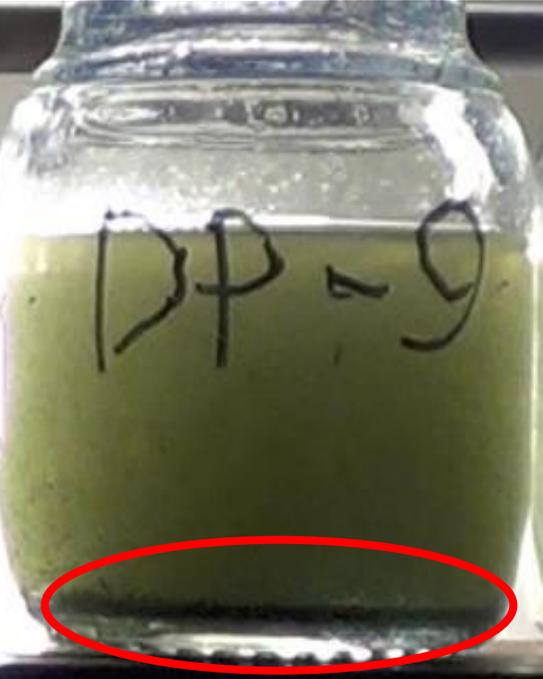
ПАА DP-9 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	средняя уст.
8 часов	24 часа
	
низкая уст.	низкая уст.

Таблица 4

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА PDA-1004**

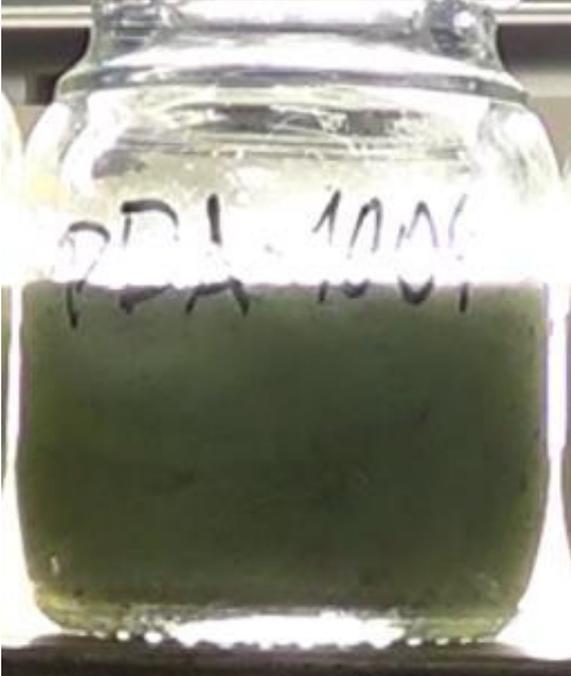
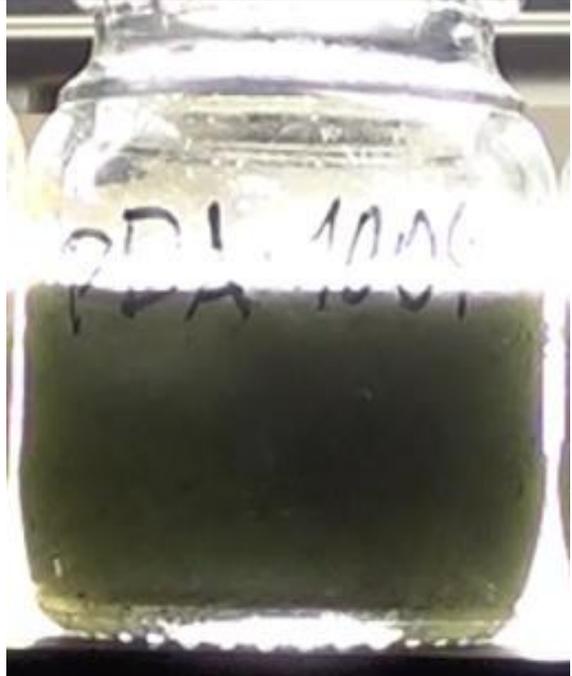
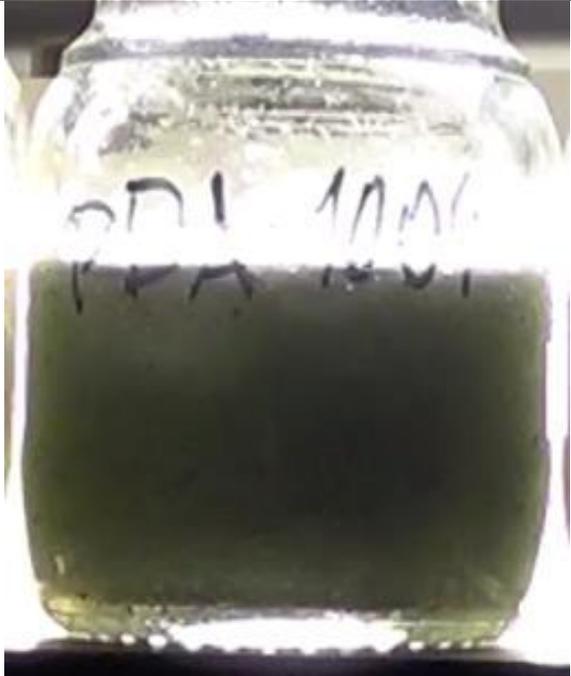
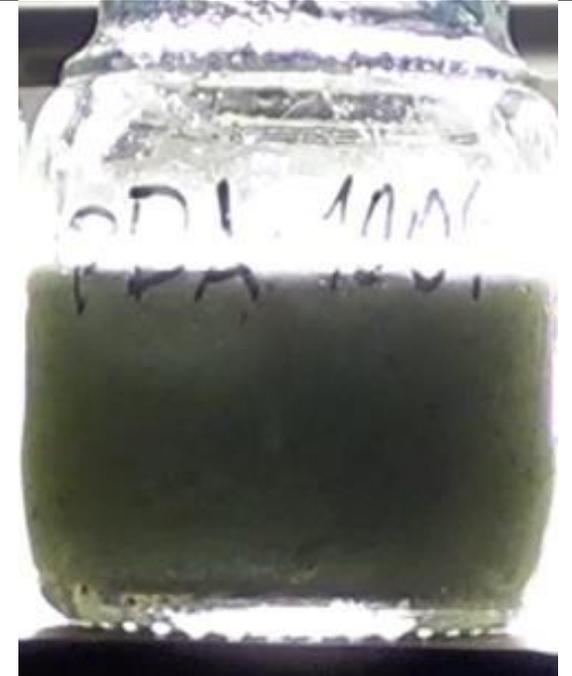
ПАА PDA-1004 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	высокая уст.
8 часов	24 часа
	
высокая уст.	высокая уст.

Таблица 5

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА Poly-T 101**

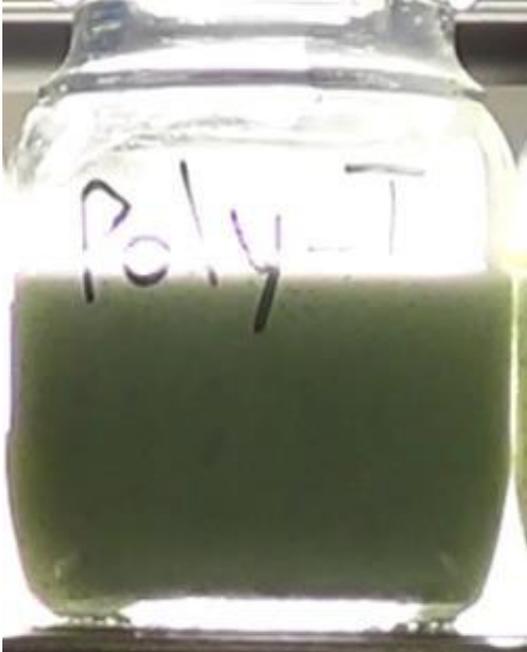
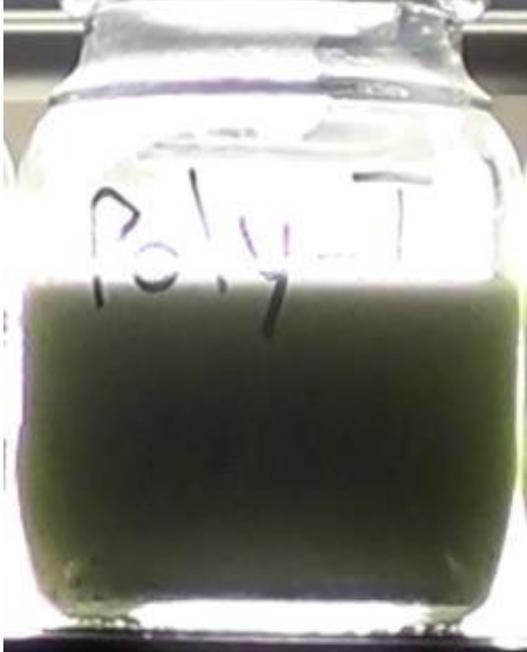
ПАА Poly-T 101 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	средняя уст.
ПАА Poly-T 101 фракция шлама менее 94 мкм	
8 часов	24 часа
	
средняя уст.	средняя уст.

Таблица 6

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА С-494**

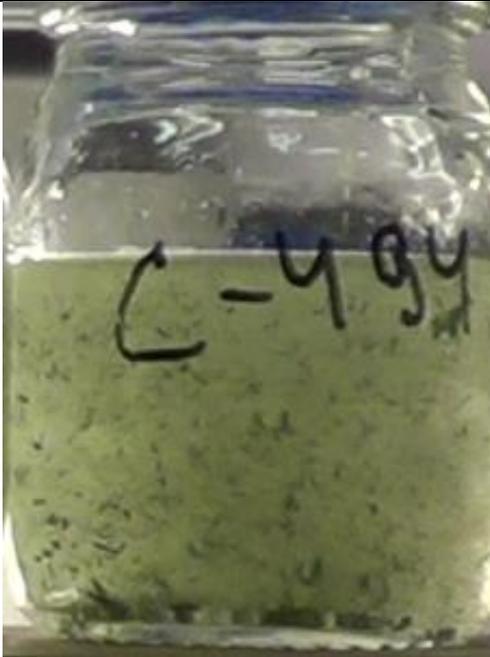
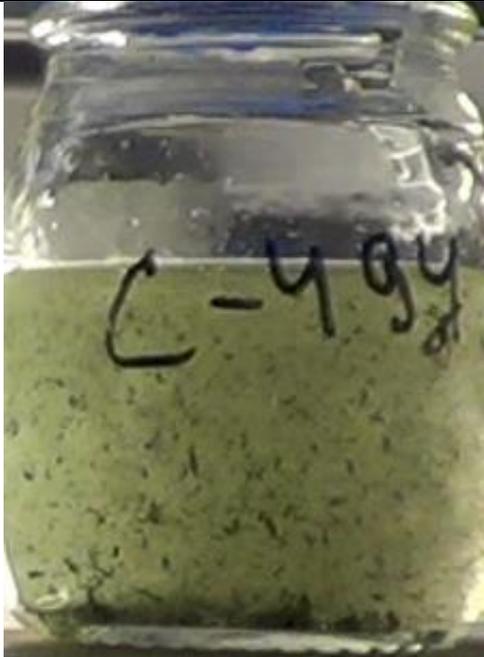
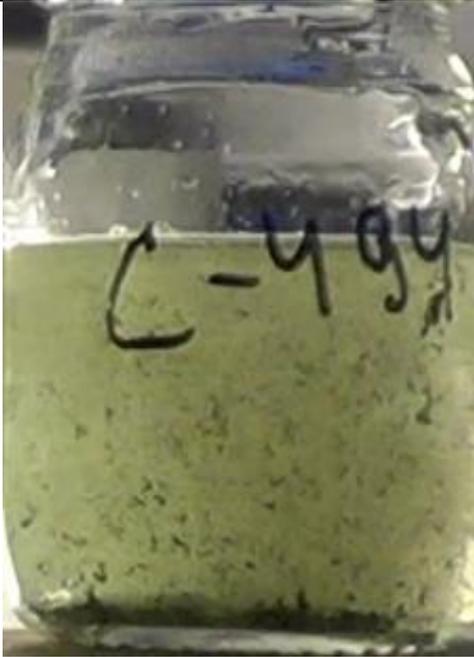
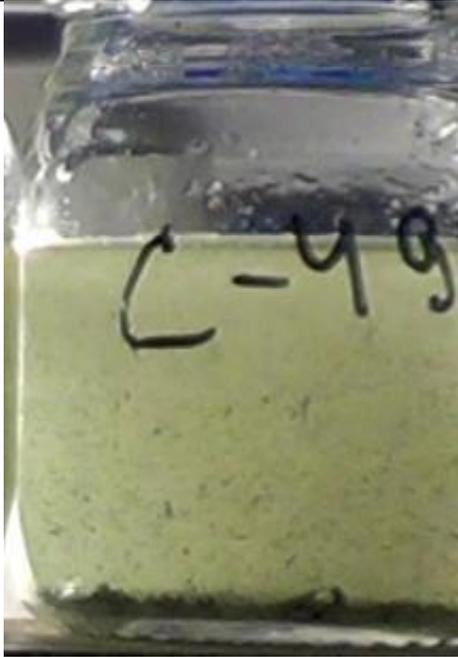
ПАА С-494 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
уст. отсутствует	уст. отсутствует
ПАА С-494 фракция шлама менее 94 мкм	
8 часов	24 часа
	
уст. отсутствует	уст. отсутствует

Таблица 7

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА Флораат 3230**

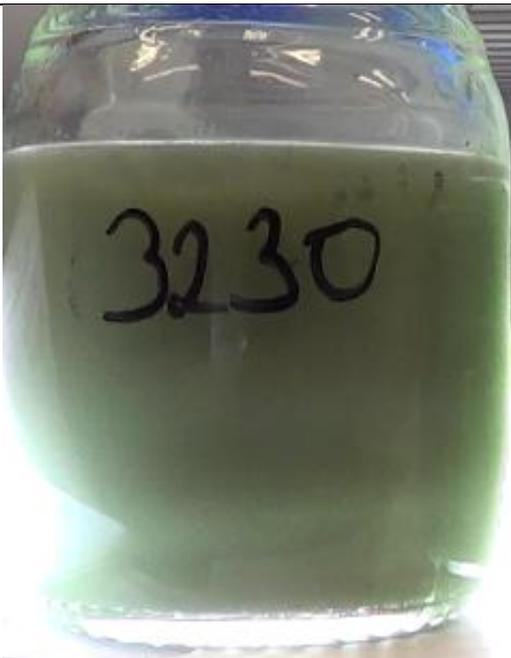
ПАА Флораат 3230 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	средняя уст.
ПАА Флораат 3230 фракция шлама менее 94 мкм	
8 часов	24 часа
	
средняя уст.	средняя уст.

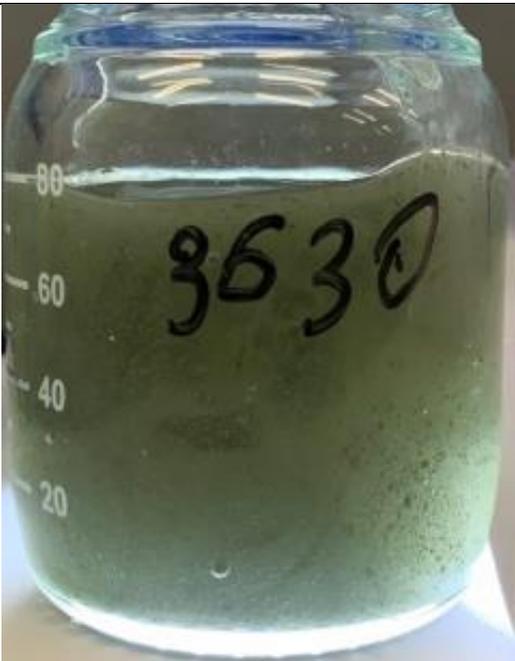
Таблица 8

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ГПАН**

ГПАН фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	высокая уст.
ГПАН фракция шлама менее 94 мкм	
8 часов	24 часа
	
высокая уст.	высокая уст.

Таблица 9

**Визуальная оценка седиментационной устойчивости ПАА Флораат 3630**

ПАА Флораат 3630 фракция шлама менее 94 мкм	
После приготовления	2 часа
	
высокая уст.	высокая уст.
ПАА Флораат 3630 фракция шлама менее 94 мкм	
8 часов	24 часа
	
высокая уст.	высокая уст.

В полимерном составе на основе Poly-T произошел такой же процесс, что и в составе с полимером ПАА PDA-1004. Однако, визуальная оценка показывает, что в осадок выпало большее количество шлама, чем в полимере ПАА PDA-1004 (Табл. 5). Таким образом, данный полимерный раствор можно отнести к растворам со средней седиментационной устойчивостью.

В растворе катионного полимера ПАА С-494 шлам полностью выпал в осадок (Табл. 6) за счет образования химических связей между положительно заряженными функциональными группами полимера и отрицательно заряженными частицами шлама. Данный полимерный раствор не обладает седиментационной устойчивостью и доказывает неприменимость катионных полимеров для ПДС.

Шлам образовал с полимером ПАА Floraam 3230 однородную структуру. Большая часть шлама вступила в реакцию и осталась во взвешенном состоянии. В конце эксперимента наблюдается незначительное увеличение количества осадка (Табл. 7). Данный полимер можно отнести к растворам со средней седиментационной устойчивостью.

В полимерах ПАА Floraam 3630 и ГПАН произошел процесс структурообразования, из-за которого более крупные частицы шлама находятся во взвешенном состоянии на протяжении всего эксперимента (Табл. 8-9). Эти полимерные растворы обладают высокой седиментационной устойчивостью.

Таблица 10

**Оценка седиментационной устойчивости по результатам визуального анализа**

№ п/п	Марка полимера	Седиментационная устойчивость полимерного раствора	Молекулярная масса, 10 <sup>6</sup> Да	Ионный заряд
1.	PDA-1004	Высокая	29,769	Анионный
2.	АМС CR650	Высокая	17,000	Анионный
3.	Флораам 3630	Высокая	11,682	Анионный
4.	ГПАН	Высокая	8,991	Анионный
5.	Флораам 3230	Средняя	8,204	Анионный
6.	Poly-T 101	Средняя	6,148	Анионный
7.	DP-9	Низкая	8,588	Анионный
8.	АН 934SH	Низкая	5,788	Анионный
9.	С-494	Отсутствует	2,333	Катионный

По результатам оценки седиментационной устойчивости разрабатываемых полимер-дисперсных составов установлено, что с увеличением молекулярной массы полимера, ПДС становится устойчивее (Табл. 10). Исключением является полимерный состав на основе анионного полимера марки DP-9 с высокой молекулярной массой, что возможно свидетельствует о том, что на седиментационную устойчивость влияет не только молекулярная масса полимера и его ионный заряд, но и другие факторы, например, плотность заряда полимера. Состав на основе катионного полимера вовсе не обладает седиментационной устойчивостью.

С целью возможности применения ПДС в коллекторах с невысокой проницаемостью оценивалось взаимодействие частиц шлама размером  $<20$  мкм с полимерами акрилового ряда марок PDA-1004, AMC CR650, Flooram 3630 и ГПАН, показавших высокую седиментационную устойчивость на предыдущем этапе. Результаты суточного эксперимента (Рис. 2) продемонстрировали высокую седиментационную устойчивость исследуемых составов. Однако наиболее однородную структуру показал ПДС на основе полимера Flooram 3630.



*Рис. 2. Результаты дополнительных испытаний с фракцией  $<20$  мкм*

## Заключение

Таким образом, анализируя результаты исследования и исходные данные о свойствах полимеров, можно отметить, что наибольшую устойчивость к осаждению частиц шлама имеют растворы полимеров с высокой молекулярной массой. Седиментационная устойчивость находится в прямой зависимости от молекулярной массы полимера. В ходе исследования установлено, что раствор катионного полимера не обладает седиментационной устойчивостью. В этой связи, указанный шлам не совместим с полимерной основой с катионным ионным зарядом.

Полимер ПАА Poly-T 101 обладает меньшей молекулярной массой, чем ПАА DP-9, однако опыт показывает, что полимерный состав на основе Poly-T 101 является более седиментационно устойчивым. Из этого возникает предположение, что на устойчивость к осаждению влияет не только молекулярная масса полимера. В предстоящих исследованиях планируется определить дополнительные факторы, влияющие на скорость осаждения частиц (например, плотность заряда полимера, минерализация пластовых вод, температура среды и др.).

Исходя из полученных результатов данного исследования применение разработанной ПДС возможно в условиях терригенных пластов нефтяных месторождений в условиях  $<120^{\circ}\text{C}$ .

В следующих работах будут представлены результаты определения времени гелеобразования методом ротационной вискозиметрии, результаты фильтрационных исследований проникающей и водоизоляционной способностей состава, сформированы общие рекомендации по подготовке реагентов к использованию их на месторождениях.

## Список литературы

1. Газизов А.А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. М: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 0–639 с.
2. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи. М: Недра, 1985. 0–308 с.
3. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // *Pet. Explor. Dev.* 2015. Т. 42, № 4. С. 525–532.
4. Кондрашев А.О., М.К. Рогачев, О.Ф. Кондрашев. Водоизоляционный полимерный состав для низкопроницаемых коллекторов // *Нефтяное хозяйство.* 2014. Т. 4. С. 63–65.
5. Алтунина Л.К., В. А. Кувшинов. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия.* 2013. Т. 2. С. 46–76.
6. Pyagay I. и др. Method for Decontamination of Toxic Aluminochrome Catalyst Sludge by Reduction of Hexavalent Chromium // *Inorganics.* 2023. Т. 11, № 7. С. 284.
7. Пат. 2796659 Российская Федерация, МПК C02F 1/62, C02F 1/70, C02F 101/22. Способ восстановления шестивалентного хрома из технологических отходов / И.Н. Пягай, О.С. Зубкова, М.А. Зубакина (РФ); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2022134212; заявл. 26.12.22; опубл. 29.05.23, Бюл. № 16. – 6 с.
8. Раупов И.Р. Комплексные исследования растворов полимеров акрилового ряда для добычи трудноизвлекаемой нефти // *Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых тяжелых нефтей.* Ухта, 2022. С. 94–98.
9. РД 39-0148311-206-85. Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода полимерного воздействия на пласт. Государственный институт по проектированию и исследовательским работам в нефтяной промышленности «Гипровостокнефть». – М.: Министерство нефтяной промышленности, 1985. - 209 с.
10. Патент № 2815111 С1 Российская Федерация, МПК C09K 8/508, E21B 33/138.: № 2023119852: заявл. 27.07.2023: опубл. 11.03.2024 / И. Р. Раупов, Ю. А. Сытник; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II".
11. Sorbie K.S. *Polymer-Improved Oil Recovery.* Dordrecht: Springer Netherlands, 1991.
12. Recommended Practices 63 (RP). *Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations.* – Washington.: American Petroleum Institute, 1990. – 74 pages.
13. Хисамов Р.С., Газизов А.А., Газизов А.Ш. Увеличение охвата продуктивных пластов воздействием. М: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. Т. 568.
14. Сеньков Н.П., Полонский Т.М. Влияние молекулярного веса на адсорбцию полимеров из разбавленных растворов // *Макромолекулы на границе раздела фаз.* К., 1971. С. 57–62.
15. Сидоров И.А. Применение растворов полиакриламида для ограничения притока вод в нефтяные скважины. М.: ВНИИ-ОЭНГ, ОЗЛ., 1976. 58 с.

## References

1. Gazizov A.A. Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdnei stadii razrabotki [Increase of oil recovery of heterogeneous formations at the late stage of development]. M: OOO «Nedra-Biznestsentr» [Nedra-Business Centre LLC], 2002. 0–639 p. (in Russian)
2. Surguchev M.L. Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniia nefteotdachi [Secondary and tertiary methods of oil recovery enhancement.]. M: Nedra, 1985 [Nedra]. 0–308 p. (in Russian)
3. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // *Pet. Explor. Dev.* 2015. T. 42, № 4. P. 525–532.
4. Kondrashev A.O., M.K. Rogachev, O.F. Kondrashev. Vodoizoliatsionnyi polimernyi sostav dlia nizkopronitsaemykh kollektorov [Water-insulating polymer composition for low-permeability reservoirs] // *Neftianoe khoziaistvo* [Oil Industry]. 2014. T. 4. P. 63–65. (in Russian)
5. Altunina L.K., V. A. Kuvshinov. Fiziko-khimicheskie metody uvelicheniia nefteotdachi plastov [Physico-chemical methods of oil recovery enhancement] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Fizika i khimiia* [Bulletin of St. Petersburg University. Physics and Chemistry.]. 2013. T. 2. P. 46–76. (in Russian)
6. Pyagai I. и др. Method for Decontamination of Toxic Aluminochrome Catalyst Sludge by Reduction of Hexavalent Chromium // *Inorganics*. 2023. T. 11, № 7. P. 284.
7. Pat. 2796659 Rossiiskaia Federatsiia, MPK C02F 1/62, C02F 1/70, C02F 101/22. Sposob vosstanovleniia shestivalentnogo khroma iz tekhnologicheskikh otkhodov [Method of hexavalent chromium recovery from technological waste] / I.N. Piagai, O.S. Zubkova, M.A. Zubakina (RF); zaiavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Sankt-Peterburgskii gorni universitet» [I.N. Pyagai, O.S. Zubkova, M.A. Zubakina (Russian Federation); applicant and patentee Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Saint-Petersburg Mining University']. no 2022134212; zaiavl. 26.12.22; opubl. 29.05.23, Biul. no 16 [No. 2022134212; applied for. 26.12.22; published 29.05.23, Bul. No. 16.]. 6 p. (in Russian)
8. Raupov I.R. Kompleksnye issledovaniia rastvorov polimerov akrilovogo riada dlia do-bychi trudnoizvlekaemoi nefi [Complex studies of acrylic polymer solutions for extraction of hard-to-recover oil] // *Problemy geologii, razrabotki i ekspluatatsii me-storozhdenii, transporta i pererabotki trudnoizvlekaemykh tiazhelykh neftei. Ukhta* [Problems of geology, development and operation of deposits, transport and processing of hard-to-recover heavy oils. Ukhta], 2022. P. 94–98. (in Russian)
9. RD 39-0148311-206-85. Rukovodstvo po proektirovaniu i tekhniko-ekonomicheskomu analizu razrabotki neftiannykh mestorozhdenii s primeneniem metoda polimernogo vozdeistviia na plast [Guidelines for design and technical and economic analysis of oil field development using the method of polymer impact on the reservoir.]. Gosudarstvennyi institut po proektirovaniu i issledovatel'skim rabotam v neftianoi promyshlennosti «Giprovostokneft'». Moskva: Ministerstvo neftianoi promyshlennosti [State Institute for Design and Research in the Oil Industry 'Giprovostokneft'. - Moscow: Ministry of Oil Industry], 1985. - 209 p. (in Russian)
10. Patent no 2815111 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK C09K 8/508, E21B 33/138.: no 2023119852; zaiavl. 27.07.2023; opubl. 11.03.2024 / I. R. Raupov, I.U. A. Sytnik [Patent No. 2815111 C1 Russian Federation, MPK C09K 8/508, E21B 33/138.: No. 2023119852: applied. 27.07.2023; published 11.03.2024 / I. R. Raupov, Y. A. Sytnik]; zaiavi-tel' federal'noe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia "Sankt-Peterburgskii gorni universitet imperatritsy Ekateriny II" [applicant Federal State

- Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II'. (in Russian)
11. Sorbie K.S. Polymer-Improved Oil Recovery. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991.
  12. Recommended Practices 63 (RP). Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations. – Washington.: American Petroleum Institute, 1990. – 74 pages.
  13. KHisamov R.S., Gazizov A.A., Gazizov A.SH. Uvelichenie okhvata produktivnykh plastov vozdeistviem [Increasing the coverage of productive formations by exposure]. M: OAO «VNII OENG» [M: OAO 'VNIYOOENG'], 2003. T. 568. (in Russian)
  14. Sen'kov N.P., Polonskii T.M. Vliianie molekuliarnogo vesa na adsorbtsiiu polimerov iz razbavlennykh rastvorov [Influence of molecular weight on adsorption of polymers from dilute solutions] // Makromolekuly na granitse razdela faz. K: [Macromolecules at the interface. Kazan], 1971. P. 57–62. (in Russian)
  15. Sidorov I.A. Primenenie rastvorov poliakrilamida dlia ograniicheniia pritoka vod v neftianye skvazhiny [Application of polyacrylamide solutions for limitation of water inflow into oil wells]. Moskva: VNII-OENG, OZL. [M.: VNII OENG, OZL.], 1976. 58 p. (in Russian)

### Сведения об авторах

*Раупов Инзир Рамилевич*, к.т.н., доцент кафедры Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

E-mail: [inzirr@yandex.ru](mailto:inzirr@yandex.ru)

*Сытник Юлия Андреевна*, аспирант кафедры Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

E-mail: [julia.andreevna.97@mail.ru](mailto:julia.andreevna.97@mail.ru)

*Ильин Дмитрий Вячеславович*, студент кафедры Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

E-mail: [dima010722@mail.ru](mailto:dima010722@mail.ru)

*Пягай Игорь Николаевич*, д.т.н., старший научный сотрудник, научный руководитель Научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

E-mail: [pyagay\\_in@pers.spmi.ru](mailto:pyagay_in@pers.spmi.ru)

*Зубакина Маргарита Александровна*, аспирант кафедры Metallургии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

E-mail: [s235034@stud.spmi.ru](mailto:s235034@stud.spmi.ru)

## Authors

*I.R. Raupov*, PhD of sciences, Associate Professor, Department of Oil and Gas Fields Development and Operation, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation  
E-mail: [inzirr@yandex.ru](mailto:inzirr@yandex.ru)

*J.A. Sytnik*, Postgraduate student, Department of Oil and Gas Fields Development and Operation, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation  
E-mail: [julia.andreevna.97@mail.ru](mailto:julia.andreevna.97@mail.ru)

*D.V. Ilin*, Student, Department of Oil and Gas Fields Development and Operation, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation  
E-mail: [dima010722@mail.ru](mailto:dima010722@mail.ru)

*I.N. Pyagay*, Doctor of Science, Senior Research Officer, Scientific Director of the Scientific Centre «Problems of processing of mineral and technogenic resources», Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation  
E-mail: [pyagay\\_in@pers.spmi.ru](mailto:pyagay_in@pers.spmi.ru)

*M.A. Zubakina*, Postgraduate student, Department of Metallurgy, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation  
E-mail: [s235034@stud.spmi.ru](mailto:s235034@stud.spmi.ru)

*Статья поступила в редакцию 13.11.2024*

*Принята к публикации 21.03.2025*

*Опубликована 30.03.2025*