

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2023.1.95-108>

EDN QKLSYQ

УДК 622.276.66

## **Обзор проведения кислотного гидравлического разрыва пласта, методики ИК-спектроскопии и промежуточные результаты исследований**

*Рыбаков А.А., Закиров Р.Р., Зимин В.Д.*

*Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия*

## **Review of acid hydraulic fracturing, IR spectroscopy techniques and interim research results**

*A.A. Rybakov, R.R. Zakirov, V.D. Zimin*

*Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia*

**E-mail: [r.akram@inbox.ru](mailto:r.akram@inbox.ru)**

**Аннотация.** Кислотный гидроразрыв пласта (КГРП) – сложный, энергоемкий и дорогостоящий технологический процесс. При разработке карбонатных коллекторов технология КГРП является одной из наиболее распространенных, которая позволяет значительно увеличить дебит добывающих скважин. При проведении КГРП необходимо уделять особое внимание рецептуре состава и технологии закачки как определяющих успешности процесса. В процессе взаимодействия кислоты как с минералогической составляющей пласта, так и с флюидами (нефть, вода) могут образовываться асфальтены, вызывающие колюматацию пласта, что снижает эффективность КГРП.

Для разработки методики подбора кислотных составов при КГРП с применением ИК-спектроскопии авторами работы рассмотрены существующие методы определения количественной оценки и степени осаждения асфальтенов для подбора оптимальной рецептуры и состава КГРП.

По результатам анализа проведенных лабораторных исследований ИК-спектроскопии для всех исследованных образцов проб нефти и составов с использованием кислотных композиций установлено, что распределение спектральных коэффициентов имеет различный характер, а также установлено влияние коэффициента разветвленности на содержание ароматических углеводородов.

**Ключевые слова:** кислотный гидроразрыв пласта, инфракрасная спектроскопия, степень ароматичности, степень алифатичности, степень разветвленности

**Для цитирования:** Рыбаков А.А., Закиров Р.Р., Зимин В.Д. Обзор проведения кислотного гидравлического разрыва пласта, методики ИК-спектроскопии и промежуточные результаты исследований // Нефтяная провинция.-2023.-№1(33).-С.95-108. - DOI [https:// doi.org/10.25689/NP.2023.1.95-108](https://doi.org/10.25689/NP.2023.1.95-108). – EDN QKLSYQ

**Annotation.** Acid hydraulic fracturing (HF) is a complex, energy-intensive and expensive technological process. In the development of carbonate reservoirs, the fracturing technology is one of the most common, which can significantly increase the flow rate of production wells. When carrying out hydraulic fracturing, it is necessary to pay special attention to the formulation of the composition and injection technology as determining the success of the process. In the process of acid interaction both with the mineralogical component of the formation and with fluids (oil, water), asphaltenes can be formed, causing formation clogging, which reduces the efficiency of hydraulic fracturing.

To develop a methodology for selecting acid compositions for hydraulic fracturing using IR spectroscopy, the authors of the work considered existing methods for determining the quantitative assessment and degree of precipitation of asphaltenes for selecting the optimal formulation and composition for hydraulic fracturing.

Based on the results of the analysis of the laboratory studies of IR spectroscopy for all the studied samples of oil samples and compositions using acidic compositions, it was found that the distribution of spectral coefficients has a different character, and the influence of the branching coefficient on the content of aromatic hydrocarbons was also established.

**Keywords:** acid fracturing, infrared spectroscopy, degree of aromaticity, degree of aliphaticity, degree of branching

**For citation:** A.A. Rybakov, R.R. Zakirov, V.D. Zimin Obzor provedeniya kislotnogo gidravlicheskogo razryva plasta, metodiki IK-spektroskopii i promezhutochnyye rezul'taty issledovaniy [Review of acid hydraulic fracturing, IR spectroscopy techniques and interim research results]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(33), 2023. pp. 95-108. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.1.95-108>. EDN QKLSYQ (in Russian)

## Обзор проведения КГРП

Одним из эффективных методов повышения продуктивности скважин, вскрывающих низко проницаемые пласты, и увеличения темпов отбора нефти из них, является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Кислотный гидроразрыв выполняется только в карбонатных породах. Это ограничение обусловлено нерастворимостью скелета песчано-глинистых пород в кислотных растворах. Реакция кислотных растворов с карбонатными по-

родами приводит к образованию высокопроводящих каналов растворения, называемых червоточинами [1].

По данным министерства энергетики Российской Федерации, на территории РФ, в настоящее время, более 65% запасов нефти приурочены к трудноизвлекаемым запасам. Для успешной разработки таких запасов необходимо использовать технологии кислотного гидравлического разрыва пласта (КГРП). В работе [2] проводилось сравнение технологий проведения КГРП с проппантом и без него. Авторы делают вывод о целесообразности применения проппантного КГРП на объектах с поровым типом коллекторов, сложенных плотными породами.

Технология КГРП заключается в последовательной закачке высоковязкой жидкости разрыва и кислоты. Закачиваемый раствор кислоты растворяет карбонатный коллектор вдоль направления трещины преимущественно в низкопроницаемых нефтенасыщенных прослоях, так как высокопроницаемые заполнены гелем. Тем самым создаются условия для приобщения ранее неработающих пропластков и повышения производительности скважин [3].

На текущий момент существуют разновидности стандартного КГРП, при которых после кислоты может производиться закачка кислотного геля для повышения области охвата, а затем нефтекислотная эмульсия или пенокислота для увеличения длины трещины [4].

В работе [5] при выполнении операций на кустовой площадке было организовано одновременное выполнение двух КГРП. В результате продолжительность работ на двух скважинах сократилась до трех суток с учетом подготовительных стадий, то есть в 3,5 раза, по сравнению с плановой продолжительностью выполнения мероприятий.

В работе [6] проводилось сравнение эффекта, получаемого от технологий КГРП без проппанта и проппантного КГРП. Сразу после проведения операций полученные значения по приросту дебита и пластового давления

были примерно одинаковые. Однако, спустя 9 месяцев на скважине, в которой был проведен классический КГРП наличие трещины уже не диагностировались, а другая трещина с размещенным в ней проппантом продолжала давать прогнозные дебиты спустя два года после проведения операции гидроразрыва.

В работе [7] также проводилось сравнение кислотного гидроразрыва пласта без использования и с использованием проппанта. Результаты свидетельствуют о том, что применение КГРП с проппантом целесообразно в карбонатных коллекторах, где не развиты трещины и каверны, что также говорит о хороших перспективах ее адресного применения в будущем.

Существует также кислотный гидроразрыв пласта, в рамках которого производится «травление» нефтесодержащей матрицы кислотой для образования червоточин, исходящих от магистральной трещины, образованной разрывом породы. [8].

Кроме того, в работах [9,10] отражены пути увеличения эффективности технологии КГРП за счет комплексного подхода к разработке месторождений при помощи горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта.

Для успешной разработки запасов необходимо использовать технологии горизонтального бурения с последующим многостадийным гидравлическим разрывом пласта [11].

Одним из основных и перспективных подходов является бурение скважин с протяженным горизонтальным стволом и проведение многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) по принципу «фабрики коллектора» [12]. Суть такого подхода состоит в создании искусственной проницаемости за счет высокоскоростных закачек жидкостей гидроразрыва и образования сети мелких трещин по всей области протяжения горизонтального ствола скважины, т.е. создании обширной области дренирования даже в маломощных продуктивных пропластках.

В работе [28] представлены результаты разработки технологии солянокислотного гидравлического разрыва пласта в сочетании с изоляцией водопотоков в добывающих скважинах, вскрывающих карбонатные коллектора.

Проведении кислотных ГРП карбонатных коллекторов необходимо уделять особое внимание рецептуре состава и технологии закачки как определяющих успешности процесса. В процессе взаимодействия кислоты как с минералогической составляющей пласта, так и с флюидами (нефть, вода) могут образовываться осадки, вызывающие когматацию пласта, что снижает эффективность процесса кислотной обработки.

### **Методики ИК - спектроскопии**

Среди существующих методов изучения строения нефтяных соединений основное место занимает метод инфракрасной спектроскопии.

Метод ИК является универсальным, исследования нефтей и нефтепродуктов проводятся в ближней, средней и дальней области ИК-спектра [23].

Фотоколориметры и спектрофотометры, работающие в видимой, ближней ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях светового излучения, дают возможность определить оптическую плотность, характеризующую способность вещества поглощать свет. В наши данные способы используются для контроля разработки нефтяных месторождений [13].

В работе [14] представлено применение инфракрасного спектрофотометра с преобразованием Фурье для определения алифатичности (доля алифатических фрагментов по отношению к ароматическим структурам), разветвленности, значения которой при химическом окислении остатков нефти снижаются, окисленности – растет с повышением гипергенной изменённости нефтей. Наибольшее значение разветвленности и наименьшее

– окисленности в начале процесса окисления сменяется ростом окисленности и сокращением разветвлённости парафиновых структур

Фурье-спектрометрами называются модуляционные спектральные приборы, в которых для получения оптического спектра производится Фурье-преобразование электрического сигнала, генерируемого фотоприемником. Главным узлом в оптических приборах с Фурье-преобразованием является интерферометр [15].

Метод ИК-спектроскопии является универсальным методом, использование которого в настоящее время является общепринятым подходом при выполнении комплексных исследований состава нефтей различных месторождений [16-21].

В данной работе [22] проведенный анализ состава нефтей, который позволил качественно и количественно охарактеризовать структурные фрагменты исследуемых образцов нефти при определении их структурно-группового углеводородного состава. ИК - спектроскопия является важным инструментальным методом как при исследовании нефтей, так и для установления происхождения или природы образца.

Для характеристики нефтей методом ИК принято использовать следующие спектры поглощения:  $720\text{--}730\text{ см}^{-1}$  отвечающая деформационным маятниковым колебаниям метиленовой группы;  $1200\text{--}1300\text{ см}^{-1}$  веерные и крутильные колебаниям  $\text{CH}_2$ - группы;  $1375\text{--}1460\text{ см}^{-1}$  соответствуют симметричным и антисимметричным деформационным колебаниям метильной и метиленовой групп. Колебания ароматических фрагментов проявляются на различных участках спектра, им соответствуют полосы с частотами  $1600, 750, 810, 870\text{ см}^{-1}$  [24-27].

В патенте [29] представлена методика системного выбора растворителя, которая включает в себя отбор проб АСПО с параллельным отбором проб продукции скважин, сравнительную оценку растворяющей способности определением изменения оптических свойств нефти после контакта с

анализируемым растворителем, что является важным инструментальным методом подбора оптимальных составов.

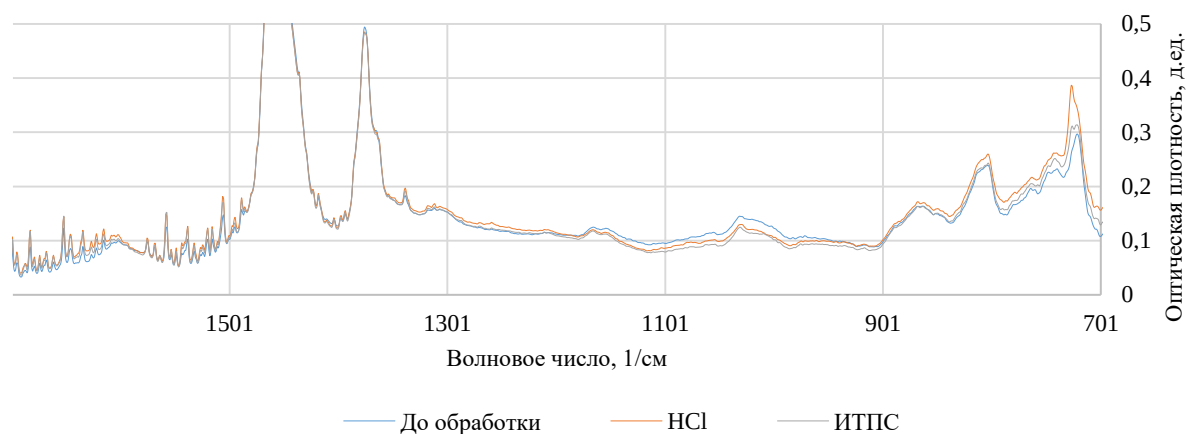
### **Промежуточные результаты исследований**

Для проведения исследований использовался ИК-Фурье спектрометр IRAffinity-1S с спектральным диапазоном по шкале волновых чисел от 7800 до 350  $\text{см}^{-1}$ . Спектральное разрешение не менее 0,5 $\text{см}^{-1}$ . Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений  $\pm 1,5\text{см}^{-1}$ .

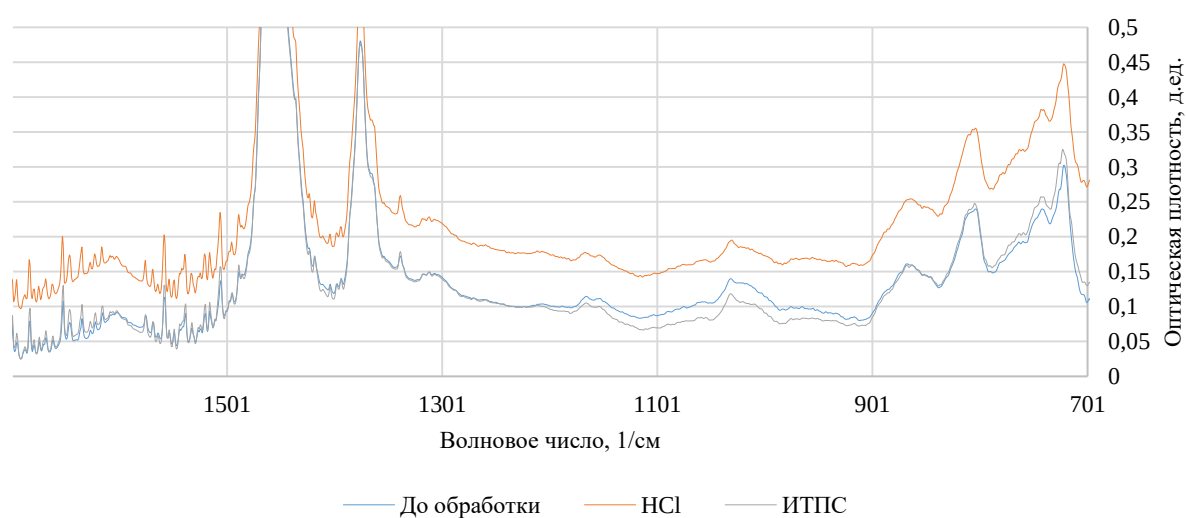
Исследование образцов нефти осуществлялось с предварительной пробоподготовкой: выполнялось центрифугирование образцов нефти в центрифуге со скоростью вращения ротора – 3000 об/мин, температуре – 20°C и подготовкой составов кислотных композиций: в мерном стакане 200 мл стеклянной палочкой размешивали расчетное содержание образца нефти и кислотного состава (15% HCL и ИТПС). Приборное время измерения спектра не превышает 1-2 минуты.

По полученным результатам определены спектральные коэффициенты, рассчитанные по соотношению характеристических поглощений. Для анализа использовались следующие спектры поглощения: 1600  $\text{см}^{-1}$  характеризующие наличие ароматических структур в нефти; 725 и 1377  $\text{см}^{-1}$  характеризующие содержание метиленовых ( $-\text{CH}_2-$ ) и метильных ( $-\text{CH}_3$ ) групп в парафиновых углеводородах.

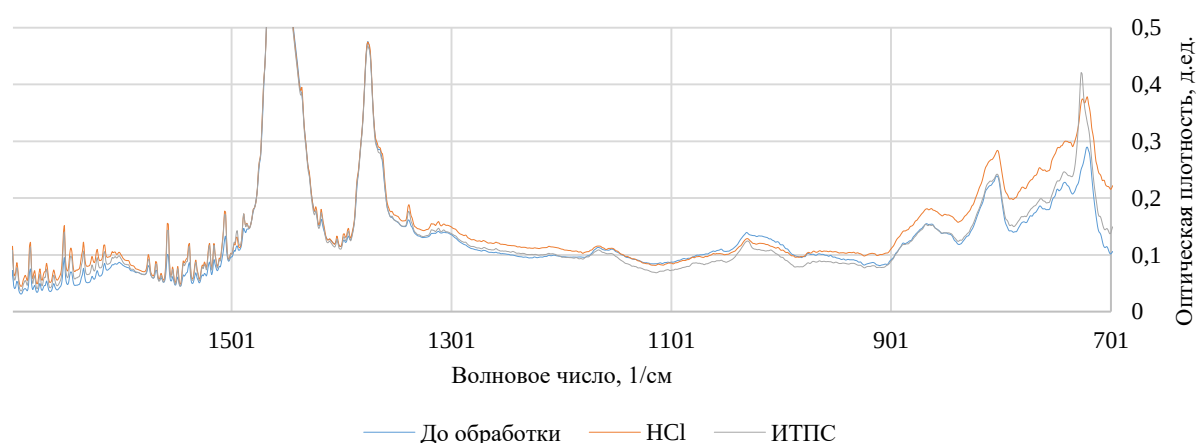
Сравнение ИК-спектров образцов нефтей до обработки и с кислотными составами приведены на рис. 1-3.



**Рис.1. ИК-спектры нефти месторождения №1**



**Рис.2. ИК-спектры нефти месторождения №2**



**Рис.3. ИК-спектры нефти месторождения №3**

Сопоставление оптических плотностей позволило рассчитать содержание ароматических углеводородов и получить спектральные коэффици-

енты: ароматичности, алифатичности, разветвленности и ароматических углеводородов.

Таблица 1

**Влияние кислотных составов на изменение количественных компонентов нефти**

| Состав и коэффициент                                                     |                 | Месторождение №1 | Месторождение №2 | Месторождение №3 |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| С <sub>ар</sub> – степень ароматичности                                  |                 |                  |                  |                  |
| С <sub>ар</sub>                                                          | Нефть           | 0,33             | 0,32             | 0,30             |
|                                                                          | Нефть + 15% HCL | 0,28             | 0,38             | 0,26             |
|                                                                          | Нефть + ИТПС    | 0,31             | 0,27             | 0,24             |
| С <sub>ал</sub> – степень алифатичности (парафинистости)                 |                 |                  |                  |                  |
| С <sub>ал</sub>                                                          | Нефть           | 8,22             | 8,68             | 9,11             |
|                                                                          | Нефть + 15% HCL | 8,38             | 6,09             | 8,89             |
|                                                                          | Нефть + ИТПС    | 8,26             | 9,24             | 9,51             |
| С <sub>р</sub> – степень разветвленности парафиновых цепей углеводородов |                 |                  |                  |                  |
| С <sub>р</sub>                                                           | Нефть           | 1,75             | 1,74             | 1,76             |
|                                                                          | Нефть + 15% HCL | 1,35             | 1,31             | 1,29             |
|                                                                          | Нефть + ИТПС    | 1,58             | 1,51             | 1,28             |
| ω <sub>ар</sub> – содержание ароматических углеводородов в нефти, %      |                 |                  |                  |                  |
| ω <sub>ар</sub>                                                          | Нефть           | 21,96            | 21,92            | 21,35            |
|                                                                          | Нефть + 15% HCL | 22,15            | 25,85            | 22,63            |
|                                                                          | Нефть + ИТПС    | 21,84            | 21,43            | 20,84            |

Как видно из таблицы, распределение коэффициентов по всем образцам нефтей и составам с кислотными композициями имеет различный характер.

Наибольший коэффициент ароматичности (С<sub>ар</sub>) имеет нефть месторождения №1, в то же время у нее самый низкий показатель алифатичности, что говорит о том, что в ее составе мало парафиновых структур.

Так, для образцов нефтей при использовании кислотного состава 15% HCL возрастает коэффициент содержания ароматических углеводородов (ω<sub>ар</sub>), а коэффициент разветвлённости (С<sub>р</sub>) снижает свое значение.

Полученные данные показывают, что спектральные коэффициенты, рассчитанные на основе ИК-спектров нефти, позволяют описать ее групповой химический состав и дают дополнительную информацию о строении

алифатической части углеводородов нефти при взаимодействии с кислотными составами.

Учитывая малое время, затрачиваемое на проведение исследований при высокой информативности, ИК спектроскопия является важным инструментальным методом как при исследовании нефтей, так и для подбора оптимальных кислотных составов для проведения кислотных ГРП.

### Список литературы

1. Салимов В.Г., Ш.Ф. Тахаутдинов, Насыбуллин А.В., Салимов О.В. Основы технологии гидравлического разрыва пластов: Учебное пособие – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2021. – 386 с.
2. Обзор методов проведения кислотного гидравлического разрыва пласта Материалы VII Международной научно-практической конференции (XV Всероссийской научно-практической конференции). Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020. - 179 с.
3. Яковлев А.Л., Березовский Д.А., Кусов Г.В. Техника и технология проведения кислотного гидравлического разрыва пласта // Геологические науки. –2019. –С. 25–40.
4. Потапов Д.В. Применение кислотного ГРП в карбонатных коллекторах // Новая наука: современное состояние и пути развития. – 2016. – №11. – С. 21–23.
5. Демакин П.С. Применение технологии Plug & Perf при многозональном гидроразрыве в скважинах с горизонтальным окончанием. Опыт поточного выполнения кислотных разрывов / П.С. Демакин // Время колтюбинга. – 2018. – № 4 (066). – С. 46–58.
6. Черепанов С.С., Чумаков Г.Н., Пономарева И.Н., Результаты проведения кислотного гидроразрыва пласта с проппанотом на Турнейско-Фаменской залежи Озерного месторождения // Вестник ПНИПУ. – 2015. – №16. – С. 70–76.
7. Мингуан Чэ, Лэйфэн Мэн Технология гидроразрыва пласта с использованием проппанта в глубоко залегающих плотных карбонатных трещиноватых коллекторах. SPE-191712-18RPTC-RU. 2018. 14 с.
8. Smith M.B., Montgomery C. Hydraulic Fracturing. Boca Raton: CRC Press, 2015. P. 756.
9. Pablo Guizada, Ali Habbtar Использование технологии многостадийного кислотного ГРП для увеличения продуктивности скважин в низкопроницаемом газонасыщенном карбонатном коллекторе. SPE-182116-RU. 2016. 12 с.
10. Majid Rafie, Tariq Almubarak Engineering approach to achieve the first successful multi-stage acid frac of a tight oil reservoir producer in Saudi Arabia. SPE-172224-MS. 2015. p. 22.
11. Л.А. Магадова, М.А. Силин, В.Н. Глущенко. Нефтепромысловая химия. Технологические аспекты и материалы для гидроразрыва пласта: учеб. пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. – 423 с.
12. Алексеев А.Д. Изучение трудноизвлекаемых и нетрадиционных объектов согласно принципу «фабрика коллектора в пласте» / А.Д. Алексеев, В.В. Жуков, К.В. Стрижнев // Записки Горного института. - 2017. - Т. 228. - С. 695-704.
13. Габдрахманов А.Т. Применение комплексного анализа спектров видимого оптического поглощения нефти для контроля процессов воздействия на пласты: диссертация.

- ционная работа на соискание учёной степени кандидата технических наук. Специальность 25.00.17
14. Габдрахманов А.Т. Изучение нефти оптическими методами в широком диапазоне спектра поглощения света для оценки влияния химреагентов на свойства нефти – подбор агентов воздействия на пласт // Материалы технической конференции SPE: Третичный методы увеличения нефтеотдачи пластов.
  15. А.Н. Харланов, М.И. Шилина Учебно-методическое пособие «Инфракрасная спектроскопия для исследования адсорбционных, кислотных и основных свойств поверхности гетерогенных катализаторов» Москва 2011.
  16. Иванова Л.В. ИК-спектроскопия в анализе нефти и нефтепродуктов / Л.В. Иванова, Р.З. Сафиева, В.Н. Кошелев // Вестник Башкирского университета. – 2008. - №4. – Т.4. – С.869-874.
  17. Гуссамов И.И. Структурно-групповой состав высоковязкой нефти Ашальчинского месторождения / И.И. Гуссамов, С.М. Петров, Д.А. Ибрагимова, Г.П. Каюкова, Н.Ю. Башкирцева // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. - №7. – Т.17. – С.248-251.
  18. Иванова Л.В. Применение ИК-спектроскопии в исследовании нефти / Л.В. Иванова, В.Н. Кошелев, Е.А. Буров, О.А. Стоколос // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2010. - №2. – С.76-80.
  19. Халикова Д.А. Особенности влияния состава нефтей месторождений Киргизии на формирование их физико-химических свойств / Д.А. Халикова, А.З. Тухватуллина, Ю.М. Ганеева, Т.Н. Юсупова // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. - №5. – С.349-357.
  20. Абдрафикова И.М. Структурно-групповой состав продуктов конверсии тяжелой Ашальчинской нефти методом ИК-Фурье-спектроскопии / И.М. Абдрафикова, А.И. Рамазанова, Г.П. Каюкова, И.И. Вандюкова, С.М. Петров, Г.В. Романов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. - №7. – Т.16. – С.237-242.
  21. Иванова Л.В. ИК-спектрометрия в анализе нефтей (на примере нефтей Волгоградской области) / Л.В. Иванова, В.Н. Кошелев, А.А. Васечкин, О.В. Примерова // Бутилеровские сообщения. – 2012. - №3. – Т.29. – С.120-124.
  22. Охлопков А.С. Свойства товарной сырой нефти, позволяющие идентифицировать источник нефтяного загрязнения окружающей природной среды к.т.н. / А.С. Охлопков. – Нижний Новгород, 2015. – 54 с.
  23. Иванова Л.В., Сафиева Р.З., Кошелев В.Н.// Вестник Башкирского государственного университета. 2008. том 13. №4. С 869-874.
  24. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. (перевод с англ.) М: Иностранная литература. 1963. 590 с.
  25. Петрова Л.М., Аббакумова Н.А., Фосс Т.Р., Романов А.Г.// Нефтехимия. 2011. Т.51. №4. С 262-266.
  26. Гринько А.А., Головкин А.К.//Нефтехимия. 2011. Т.51. №3. С 204-213.
  27. Сваровская Л.И., Филатов Д.А., Гэрэлмаа Т., Алтунина Л.К.//Нефтехимия. 2009. Т.49. №2. С 153-158.
  28. Магадова Л.А. Солянокислотный разрыв в сочетании с изоляцией водопритоков / М.А. Силин, В.Б. Губанов, В.Н. Мариненко // Российская технологическая нефтегазовая конференция и выставка SPE 2008. SPE-117366.
  29. Пат. № 2429344 (РФ) МПК E21B 43/22 Способ оценки эффективности растворителей органических отложений / Ибрагимов Н.Г., Гуськова И.А., Шафигуллин Р.И. и др.: опубл. 20.09.2011 г.

## References

1. Salimov V.G., Takhautdinov Sh.F., Nasybullin A.V., Salimov O.V. Osnovy tekhnologii gidravlicheskogo razryva plastov [Fundamentals of hydraulic fracturing technology]. Kazan: FAN Publ., 2021. 396 P. (in Russian)
2. Obzor metodov provedeniya kislotnogo gidravlicheskogo razryva plasta [Review of acid fracturing methods]. Proceedings of the VII Research Conference. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2020. 170 P. (in Russian)
3. Yakovlev A.L., Berezovskiy D.A., Kusov G.V. Equipment and technology of acid fracturing. Geologicheskkiye Nauki [Geological Sciences], 2019, pp. 25-40. (in Russian)
4. Potapov D.V. Primenenie kislotnogo GRP v karbonatnykh kollektorakh [Application of acid fracturing in carbonate reservoirs]. Novaya Nauka: Sovremennoe Sostoyanie i Puti Razvitiya [New Science: Current State and Trends of Development], 2016, No.11, pp. 21–23. (in Russian)
5. Demakin P.S. Primenenie tekhnologii Plug & Perf pri mnogoazonalnom gidrorazryve v skvazhinakh s gorizontalnym okonchaniem. Opyt potochnogo vypolneniya kislotnykh razryvov [Application of the plug & perf technology for multistage fracturing in horizontal wells. Experience of simultaneous acid fracturing in 2 wells]. Coiled Tubing Times, 2018, No. 4 (066), pp. 46–58. (in Russian and English)
6. Cherepanov S.S., Chumakov G.N. Results of applying acidic hydraulic fracturing with proppant in the Tournaisian-Famennian reservoirs at the Ozerne field. Vestnik Permskogo Natsionalnogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta [Bulletin of Perm National Research Polytechnical University], 2015, No.16, pp. 70–76. (in Russian)
7. Mingguang Che, Leifeng Meng. Propped fracturing in deep naturally-fractured tight carbonate reservoirs. SPE-191712-18RPTC-RU. 2018. 14 P. (in English)
8. Smith M.B., Montgomery C. Hydraulic Fracturing. Boca Raton: CRC Press, 2015. P. 756.
9. Pablo Guizada, Ali Habbtar. Competent utilization of multistage acid fracturing technology to increment well productivity during stimulation of low permeability gas carbonate reservoirs – Case study. SPE-182116-RU. 2016. 12 P. (in English)
10. Majid Rafie, Tariq Almubarak Engineering approach to achieve the first successful multistage acid frac of a tight oil reservoir producer in Saudi Arabia. SPE-172224-MS. 2015. p. 22.
11. Magadova L.A., Silin M.A., Glushchenko V.N. Neftepromyslovaya khimiya. Tekhnologicheskiye aspekty i materialy dlya gidrorazryva plasta [Oilfield chemistry. Technological aspects and materials for hydraulic fracturing]. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2012. 423 P. 9. (in Russian)
12. Alekseev A.D., Zhukov V.V., Strizhnev K.V. Izuchenie trudnoizvlekaemykh i netraditsionnykh obektov soglasno printsipu «fabrika kollektora v plaste» [Study of hard-to-recover and unconventional targets according to “reservoir factory” principle. Zapiski Gornogo Instituta [Journal of Mining Institute], 2017. Vol. 228, pp. 695-704. (in Russian)
13. Gabdrakhmanov A.T. Comprehensive analysis of visible optical oil absorption spectra to monitor reservoir stimulation processes. PhD thesis. (in Russian)
14. Gabdrakhmanov A.T. Oil studies using optical methods in a wide range of light absorption spectra to assess the impact of chemical agents on oil properties - Selection of chemical agents for stimulation. Proceedings of SPE Conference: Enhanced Oil Recovery. (in Russian)
15. Kharlanov A.N., Shilina M.I. Infekrasnaya spektroskopiya dlya issledovaniya adsorbtsionnykh, kislotnykh i osnovnykh svoystv poverkhnosti geterogennykh katalizatorov [Infrared spectroscopy for study of adsorption, acid and base surface properties of heterogeneous catalysts]. Moscow, 2011. (in Russian)

16. Ivanova L.V., Safieva R.Z., Koshelev V.N. IK-spektroskopiya v analize nefiti i nefteproduktov [Infrared spectroscopy in the analysis of oil and petroleum products]. Vestnik Bashkirskogo Universiteta [Bulletin of Bashkir University], 2008, No. 4, Vol.4, pp.869-874. (in Russian)
17. Gussamov I.I., Petrov S.M., Ibragimova D.A., Kayukova G.P., Bashkirtseva N.Yu. Strukturno-grupповой состав vysokovyazkoj nefiti Ashalchinskogo mestorozhdeniya [Structural and group composition of high-viscosity oil of Ashalchinskoye field]. Vestnik Kazanskogo Universiteta [Bulletin of Kazan University], 2014, No. 7, Vol.17, pp. 248-251 (in Russian)
18. Ivanova L.V., Koshelev V.N., Burov E.A., Stokolos O.A. Primenenie IK-spektroskopii v issledovanii nefiti [Application of infrared spectroscopy in oil research]. Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2010, No.2, pp.76-80. (in Russian)
19. Khalikova D.A., Tukhvatullina A.Z., Ganeeva Yu.M., Yusupova T.N. Osobennosti vliyaniya sostava neftey mestorozhdeniy Kirgizii na formirovanie ikh fiziko-khimicheskikh svoystv [Influence of the composition of Kyrgyzstan oil on the formation of physical and chemical properties]. Vestnik Kazanskogo Technologicheskogo Universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 2009, No.5, pp. 349-357. (in Russian)
20. Abdrafikova I.M., Ramazanova A.I., Kayukova G.P., Vandyukova I.I., Petrov S.M., Romanov G.V. Strukturno-grupповой состав produktov konversii tyazheloy Ashalchinskoy nefiti metodom IK-Fur'e-spektroskopii [Structural and group composition of Ashalchinskoye field heavy oil conversion products using Fourier-transform IR spectroscopy]. Vestnik Kazanskogo Technologicheskogo Universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 2013, No.7, Vol.16, pp.237-242. (in Russian)
21. Ivanova L.V., Ivanova L.V., Koshelev V.N., Vasechkin A.A., Primerova O.V. IK-spektrometriya v analize neftey (na primere neftey Volgogradskoy oblasti) [Infrared spectrometry in oil analysis (using Volgograd Region oil as an example)]. Butlerovskiye soobsheniya [Butlerov Communications], 2012, No.3, Vol.29, pp.120-124. (in Russian)
22. Okhlopkov A.S. Svoystva tovarnoy syroy nefiti, pozvolyayushchie identifikatsirovat istochnik neftyanogo zagryazneniya okruzhayushchey prirodnoy sredy [Properties of commercial crude oil enabling identification of the sources of oil pollution of the environment]. PhD thesis. Nizhny Novgorod, 2015. 54 P.
23. Ivanova L.V., Safieva R.Z., Koshelev V.N. Vestnik Bashkirskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Bulletin of Bashkir State University], 2008, Vol. 13, No. 4, pp. 869-874. (in Russian)
24. Bellamy L. The infrared spectra of complex molecules. Moscow: Foreign Literature Publ., 1963. 590 P. (translated from English)
25. Petrova L.M., Abbakumova N.A., Foss T.R., Romanov A.G. Neftekhimiya [Oil chemistry], 2011, Vol.51, No. 4, pp. 262-266. (in Russian)
26. Grinko A.A., Golovko A.K. Neftekhimiya [Oil chemistry], 2011, Vol.51, No.3, pp. 204-213. (in Russian)
27. Svarovskaya L.I., Filatov D.A., Gerelmaa T., Altunina L.K. Neftekhimiya [Oil chemistry], 2009, Vol. 49, No. 2, pp. 153-158. (in Russian)
28. Magadova L.A., Silin M.A., Gubanov V.B., Marinenko V.N. Solyanokislenny razryv v sochetanii s izolyatsiey vodopritokov [Hydrochloric Acid Fracturing Combined with Water Shut-Off]. Russian Oil & Gas Conference and Exhibition SPE 2008. SPE-117366. (in Russian and English)
29. Ibragimov N.G., Guskova I.A., Shafigullin R.I. Method for assessing the effectiveness of organic scale solvents, RF Patent No. 2429344, Int. Cl. E21B 43/22 (in Russian)

### **Сведения об авторах**

*Рыбаков Акрам Александрович*, к.т.н., доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (РиЭНГМ), Альметьевский государственный нефтяной институт

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 2

E-mail: r.akram@inbox.ru

*Закиров Ринат Рашитович*, аспирант, инженер лаборатории "Нефтепромысловая химия" Центра научно-технических исследований (НПХ ЦНТИ) Альметьевский государственный нефтяной институт

Россия, 423450, Республика Татарстан, Альметьевск, ул. Ленина, 2

E-mail: zakirov-rinat-94@mail.ru

*Зимин Владимир Дмитриевич*, ведущий специалист отдела сопровождения ключевых инновационных процессов Центра технологического развития (ЦТР), ПАО «Татнефть»

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, 75

E-mail: zimin9404@mail.ru

### **Authors**

*A.A. Rybakov*, PhD, Assistant Professor, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields), Almeteyevsk State Oil Institute

2, Lenina st., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation

E-mail: r.akram@inbox.ru

*R.R. Zakirov*, Postgraduate Student, Engineer, Oilfield Chemistry Laboratory, Scientific and Technical Research Center, Almeteyevsk State Oil Institute

2, Lenina st., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation

E-mail: zakirov-rinat-94@mail.ru

*V.D. Zimin*, Leading Specialist, Key Innovative Processes Support Department, Technological Development Center, PJSC TATNEFT

75, Lenina st., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation

E-mail: zimin9404@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17.02.2023*

*Принята к публикации 20.03.2023*

*Опубликована 30.03.2023*