

Таким образом, можно сделать выводы, что при увеличении доли вовлеченных в разработку нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов ключевую роль приобретает ГРП, который представляет собой сложный, дорогостоящий и высокорисковый процесс. Поэтому для оптимальной разработки месторождений необходимо знать информацию о размерах и направлении развития трещин. Наземный микросейсмический мониторинг, основанный на полноволновом численном моделировании и методе максимального правдоподобия, при корректных технологических подходах позволяет решать эти задачи. Проведенные опытно-промысловые работы позволили оптимизировать проведение полевых работ и выделить ключевые технологические показатели, влияющие на конечный результат. Приведенные примеры комплексирования МСМ другими методами позволяют судить о его результативности и целесообразности применения в сложных сейсмогеологических условиях Припятского прогиба.

#### Литература

1. Сейсмическая локация очагов эмиссии – новая технология мониторинга добычи УВ / О. Л. Кузнецов [и др.] // EAGE : тез. докл. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16–19 окт., 2006 г. / EAGO, SEG. – Спб., 2006.
2. Steiner, B. Time reverse modeling of low- frequency microtremors: A potential method for hydrocarbon reservoir localization / B. Steiner, E. H. Saenger, S. M. Schmalholz // Geophys. Res. Lett. – 2008. – Vol. 35. – P. L03307.
3. Мокшин, Е. В. Сопоставление метода «TIME REVERSE MODELING» и метода дифракционного суммирования / Е. В. Мокшин, Д. В. Бережной, Е. В. Биряльцев // Экспозиция Нефть Газ. – 2012. – № 2. – С. 26–28.
4. Биряльцев, Е. В. Определение преимущественного направления трещиноватости на основе полноволнового численного моделирования распространении волн и метода максимального правдоподобия / Е. В. Биряльцев, В. А. Рыжов, М. Р. Камиллов // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 6. – С. 22–25.
5. Построение модели механических свойств, давлений и напряжений по скважинам Речицкого месторождения в интервалах I–III пачки : информац. отчет 48.2019 / БелНИПИнефть. – 2019. – 165 с.
6. 2020. Practical Experience of Unconventional's Multistage Fracturing in Belarus / K. V. Mironenko [et al.] // SPE. – 2020. – P. 202059.

УДК 550.4.08

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСНЫХ КОМПОНЕНТОВ В КВАРЦЕВОМ ПЕСКЕ ДЛЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ**

**Ф. В. Дегтярёв, Д. А. Шенец**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,  
г. Гомель*

*При проведении операции гидравлического разрыва пласта используется расклинивающий агент – керамический проппант или кварцевый песок. Последний отличается более низкой стоимостью, что позволяет достичь снижения стоимости операции по гидроразрыву пласта при полном сохранении эффективности. При этом возникает необходимость в исследовании кварцевого песка на наличие примесных компонентов. Для этих целей хорошо подходит метод рентгеновской дифракции, так как он позволяет работать с любым объемом образца, не требует длительной пробоподготовки и позволяет получить исчерпывающую информацию о фазовом составе и об особенностях кристаллического строения*

веществ. Определен минеральный состав пяти проб кварцевого песка для ГПП. Пробы разделены на группы по концентрации и компонентному составу примесей.

**Ключевые слова:** рентгеновская дифракция, кварцевый песок, гидроразрыв пласта, минеральный состав.

## DETERMINATION OF IMPURITY COMPONENTS IN QUARTZ SAND FOR HYDRAULIC FRACTURING BY X-RAY DIFFRACTION

F. V. Degtyarev, D. A. Shenets

*BelNIPIneft RUE "Production Association "Belorusneft", Gomel*

*During the hydraulic fracturing operation, a propping agent is used – ceramic proppant or quartz sand. The latter is characterized by a lower cost, which makes it possible to achieve a reduction in the cost of hydraulic fracturing operations while maintaining full efficiency. At the same time, there is a need to study quartz sand for the presence of impurity components. For these purposes, the X-ray diffraction method is well suited because it allows you to work with any volume of the sample, does not require long sample preparation and allows you to get comprehensive information about the phase composition and about the features of the crystalline structure of substances. In this work, the mineral composition of five samples of quartz sand for hydraulic fracturing was determined. The samples are divided into groups according to the concentration and component composition of impurities.*

**Keywords:** x-ray diffraction, quartz sand, hydraulic fracturing, mineral composition.

Важной частью процесса разработки нефтяного месторождения является гидравлический разрыв пласта (ГПП), в процессе которого может использоваться кварцевый песок в качестве расклинивающего агента, как аналог керамического проппанта. Применение кварцевого песка с минимальным количеством примесей позволяет достичь снижения стоимости операции по гидроразрыву пласта при полном сохранении эффективности.

Метод рентгеновской дифракции позволяет довольно точно определять минеральный состав исследуемых образцов и, таким образом, осуществлять контроль качества используемого сырья. Рентгеновская дифракция порошковых образцов обладает рядом несомненных преимуществ по сравнению с другими методами анализа:

– одинаковая эффективность работы как с массивными образцами, так и с микропробами;

– получение информации не только о фазовом составе, но и об особенностях кристаллического строения веществ, внутренних напряжениях и преимущественной ориентировке кристаллитов вещества в объеме исследуемого препарата;

– отсутствие сложной и дорогостоящей пробоподготовки.

Универсальность, высокая достоверность и уникальность получаемых данных делают метод рентгеновской дифракции одним из наиболее востребованных в науке и производстве.

В основе метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке соединений, которое подчиняется закону Брэгга–Вульфа [1].

Вид дифракционной картины монокомпонентного соединения зависит от параметров элементарной ячейки – положения дифракционных максимумов (рефлексов) – и распределения атомов в ячейке – интенсивности рефлексов, следовательно, каждое соединение обладает уникальной дифрактограммой. При регистрации дифракционной картины поликомпонентных образцов результат представляет собой наложение дифрактограмм монокомпонентных соединений, причем положение рефлексов, от-

носящихся к отдельным фазам, не меняется, а относительная интенсивность рефлексов зависит от количественного содержания данного компонента в смеси.

Метод рентгеновской дифракции позволяет решать задачи не только контроля качества материалов. В нефтяной отрасли данный метод анализа применим для определения качественного и количественного фазового состава как образцов горных пород, так и техногенных продуктов, связанных с бурением скважин и разработкой углеводородов, – бурового шлама, химических реагентов, различных осадков, поллютантов и др.

Исследование образцов методом рентгеновской дифракции проводится на рентгеновском дифрактометре Smartlab SE, производства японской компании «Rigaku». Угловой диапазон съемки по 2 $\theta$  составляет от 3 до 55°, шаг сканирования – 0,01°. Исследуемый образец представляет собой порошок с размером частиц менее 0,1 мм, полученный измельчением на планетарной мельнице «Fritsch Pulverisette» 5/4 с размольной гарнитурой из закаленной нержавеющей стали.

Перед анализом порошок помещается в алюминиевую круглую кювету, поверхность образца тщательно выравнивается с целью улучшения качества получаемой дифрактограммы. В процессе записи образец вращается со скоростью 30 об/минуту, это необходимо для равномерного облучения образца, увеличения площади анализа и получения более статистически достоверных данных.

Интерпретация полученных данных основывается на поиске и определении положения всех рефлексов и соответствующих им величин межплоскостных расстояний  $d$  согласно закону Брэгга–Вульфа. Далее при помощи программного комплекса «SmartLab Studio» II производится идентификация фаз по обнаруженным рефлексам.

Фазовый анализ проводится путем сравнения положения пиков и их интенсивностей с положением пиков и интенсивностей эталонных образцов, содержащихся в международных базах дифракционных стандартов ICDD PDF-2 Release 2021 и COD. Количественное определение фаз в образцах и уточнение параметров элементарной ячейки вещества проводится по методу Ритвельда (полнопрофильного анализа) путем моделирования теоретической дифрактограммы, ее сравнения с экспериментальной дифрактограммой и дальнейшего уточнения параметров элементарной ячейки в целях лучшей сходимости.

При использовании количественного рентгенофазового анализа по методу Ритвельда содержание кристаллических фаз всегда нормировано на 100 %.

В рамках данной работы проанализированы 5 проб кварцевого песка для ГРП от различных производителей. Результаты анализа представлены в таблице. Исходя из полученных данных, можно сделать выводы, что кроме основной фазы – кварца, в образцах в различных концентрациях присутствуют примеси других минералов. Наличие примесей минералов и их концентрация в исследуемых образцах свидетельствуют о степени чистоты данных образцов.

**Результаты определения минерального состава проб кварцевого песка методом рентгеновской дифракции**

Номер пробы	Минеральный состав, %							
	Кварц	Калиевые полевые шпаты	Плагиоклазы	Пироксены	Амфиболы	Слюды	Доломит	Кальцит
1	90,3	4,3	4,0	–	–	1,4	–	–
2	96,7	2,6	–	0,7	–	–	–	–

Номер пробы	Минеральный состав, %							
	Кварц	Калиевые полевые шпаты	Плагиоклазы	Пироксены	Амфиболы	Слюда	Доломит	Кальцит
3	100,0	—	—	—	—	—	—	—
4	92,3	—	7,6	—	—	—	—	0,1
5	74,7	24,5	—	—	0,5	—	0,3	—

На рис. 1 представлены участки дифрактограмм порошковых проб кварцевого песка в диапазоне углов по  $2\theta$  от 21 до 44°, где расположены наиболее интенсивные рефлексы кварца и примесных минералов.

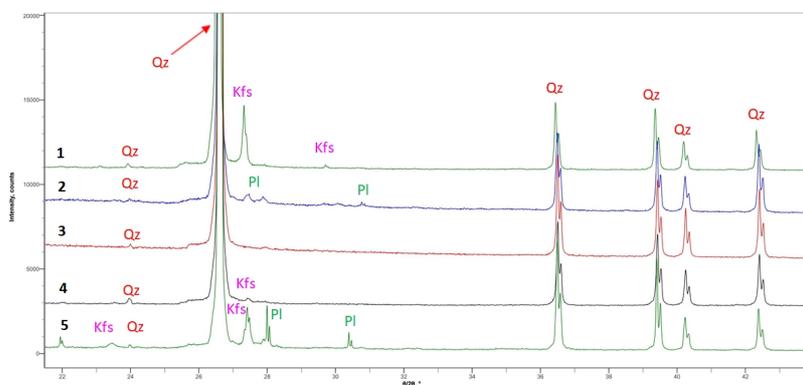


Рис. 1. Участок дифрактограммы порошковых проб кварцевого песка в диапазоне углов по  $2\theta$  от 21 до 44°:

Kfs – калиевый полевой шпат (КПШ); Pl – плагиоклаз; Qz – кварц [2]

При выборе кварцевого песка для ГРП важна чистота сырья, поэтому согласно полученным данным исследуемые пробы разделены на три группы по содержанию примесей:

1. Содержание примесей более 10 % (проба 5). Данная группа характеризуется относительно низким содержанием кварца и высоким содержанием примесей.

2. Содержание примесей от 2 до 10 % (пробы 1, 2, 4). Данная группа характеризуется средним количеством примесей различного состава.

3. Содержание примесей от 0 до 2 % (проба 3). К данной группе относятся наиболее «чистые» образцы кварцевого песка, содержащие наименьшее количество примесей или не содержащие их вовсе.

Также исследуемые пробы разделены на четыре группы по минеральному составу примесей (учитывалось содержание примесного минерала более 1 %):

1. Примесь калиевых полевых шпатов (пробы 2, 5).

2. Примесь плагиоклазов (проба 4).

3. Смешанные примеси (проба 1).

4. Примеси отсутствуют (проба 3).

Таким образом, при помощи метода рентгеновской дифракции определен минеральный состав пяти проб, предложено разделение исследованных проб кварцевого песка на группы по содержанию и компонентному составу примесей.

Литература

1. Ковба, Л. М. Рентгенофазовый анализ / Л. М. Ковба, В. К. Трунов. – М. : МГУ, 1976. – 232 с.
2. Whitney, D. L. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals / D. L. Whitney, B. W. Evans // American Mineralogist. – 2010. – Vol. 95. – P. 185–187.

УДК 620.22

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ  
НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ  
НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН РУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ОБЪЕДИНЕНИЕ «БЕЛОРУСНЕФТЬ»**

**Ю. И. Попкова, П. А. Петрикевич**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,  
г. Гомель*

*Рассмотрена проблема коррозии насосно-компрессорных труб в условиях нагнетательных скважин Речицкого нефтяного месторождения РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». В настоящее время защита от коррозии подземного оборудования скважин является достаточно актуальной задачей. Преждевременные подъемы по причине коррозии НКТ приводят к увеличению себестоимости нефти. Одной из перспективных технологий антикоррозионной защиты является применение низколегированных сталей. Приведены результаты стендовых испытаний трубных сталей НКТ, показавших технологическую эффективность в сравнении с промышленно применяемой трубной сталью 32Г1А группы прочности N80 (Q) API Spec 5CT, в условиях, моделирующих скважинные, – трубная сталь 30Х группы прочности L80 (1) API Spec 5CT, 32ХГ группы прочности P110 API Spec 5CT, а также результаты их промысловых испытаний.*

**Ключевые слова:** коррозия, НКТ, трубная сталь, низколегированная сталь, скважина.

**APPLICATION OF LOW-ALLOWED TUBE STEEL  
IN THE INJECTION WELLS CONDITIONS OF PRODUCTION  
ASSOCIATION BELORUSNEFT**

**U. Popkova, P. Petrikevich**

*BelNIPIneft RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The paper describes the problem of tubing corrosion in the injection wells conditions of Rchitskoe oil field of Production Association «Belorusneft». Nowadays corrosion protection of well equipment is quite an urgent issue. Premature well equipment lifting due to tubing corrosion leads to an increase of oil production cost. One of the promising corrosion protection technologies is the use of low-alloyed steels. The paper presents the results of bench tests of tubing steel which showed technological efficiency in comparison with commercially used tubing steel grade 32Mn1N N80 (Q) API Spec 5CT in conditions simulating downhole – grade 30Cr L80 (1) API Spec 5CT, grade 32MnCr P110 API Spec 5CT and the results of their field tests.*

**Keywords:** corrosion, tubing, tube steel, low-allowed steel, well.

Для поддержания пластового давления на месторождениях Беларуси применяется технология закачки воды в пласт через нагнетательные скважины. По классификации В. А. Сулина, нагнетаемая вода относится к хлоридно-кальциевому типу [1]. По минерализации относится к рассолам крепким [2]. По значению водородного показателя вода относится к слабокислым [2]. Попутно добываемая вода содержит растворенный углекислый газ  $\text{CO}_2$  и гидрокарбонат  $\text{HCO}_3^-$ . Сероводород в продукции