

Механизм распространения индикатора в терригенном пласте при трассерных исследованиях

Изотов А.А., Афонин Д.Г.

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия
aaizotov@tnnc.rosneft.ru, dgafonin@tnnc.rosneft.ru

Аннотация

Трассерный метод исследования применяется на нефтяных месторождениях при исследовании фильтрационных потоков в пласте. Исследования выявляют схожие явления: высокую для пористой среды скорость движения меченой воды, неравномерную геометрию распределения потоков по площади залежи. Это до сих пор вызывает различные гипотезы у исследователей.

В работе на основе геолого-промыслового анализа и результатов исследований предлагается концепция распространения индикатора в терригенном пласте по техногенным трещинам авто-ГРП, снимающая противоречия и объединяющая гипотезы и факты. Предложен способ расчета параметров трещин с целью планирования изоляционных работ.

Материалы и методы

Материалы: база данных геолого-промысловой информации, технологический режим работы скважин по месторождениям Российской Федерации.

Методы: геолого-промысловый анализ, построение аналитических зависимостей.

Ключевые слова

трассерные исследования, заводнение, обводненность, авто-ГРП

Для цитирования

Изотов А.А., Афонин Д.Г. Механизм распространения индикатора в терригенном пласте при трассерных исследованиях // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 5. С. 31–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-5-31-34

Поступила в редакцию: 05.05.2021

GEOLOGY

UDC 553.98 (571.1) | Original paper

The mechanism of the indicator propagation in a terrigenous formation during tracer studies

Izotov A.A., Afonin D.G.

“Tyumen oil research center” LLC, Tyumen, Russia
aaizotov@tnnc.rosneft.ru, dgafonin@tnnc.rosneft.ru

Abstract

The tracer method of research is used in oil fields in the study of filtration flows in the reservoir. Studies reveal similar phenomena: a high speed of movement of labeled water for a porous medium, an uneven geometry of the distribution of flows over the area of the deposit. This still causes various hypotheses among researchers.

Based on the geological and field analysis and research results, the concept of the indicator propagation in a terrigenous formation through technogenic fractures of auto-fracturing is proposed, which removes contradictions and combines hypotheses and facts. A method for calculating the parameters of cracks for the purpose of planning insulation works is proposed.

Materials and methods

Materials: analytical database, monthly operational reports on the deposits of the Russian Federation.

Methods: geological and commercial analysis, graphical representation of dependencies.

Keywords

tracer studies, flooding, waterlogging, auto-hydraulic fracturing

For citation

Izotov A.A., Afonin D.G. The mechanism of indicator propagation in a terrigenous formation during tracer studies // Exposition Oil Gas. 2021. № 5. С. 31–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-5-31-34

Received: 05.05.2021

За 50 лет проведения исследований остается открытым вопрос о распространении индикатора в терригенном пласте. Проведение трассерных исследований в СССР начато с 1970-х гг. с целью контроля за разработкой месторождений Восточного Предкавказья и Нижнего Поволжья, представленных трещиноватыми известняками. Позднее

исследования проведены на месторождениях с терригенным коллектором, в том числе Туймазинском. В трещиноватом известняке Старогрозненского месторождения скорость движения индикатора между скважинами лишь в отдельных случаях достигала 30 м/сут. Случайный характер распределения густоты и раскрытости естественных трещин

в объеме известняка не способствует формированию преимущественных направлений фильтрации. Этим можно объяснить результат исследований, зафиксированный на Брагунском месторождении, где за один год индикатор преодолел расстояние в 1 км. Напротив, скорость индикатора в терригенном коллекторе Туймазинского месторождения

достигала 450 м/сут [1]. Отсюда авторы [2] делают вывод: «чем меньше трещин в пласте и чем более четкую направленность они имеют, тем благоприятнее условия для быстрых прорывов нагнетаемой воды».

В публикациях встречаются термины «высокопроницаемые пути фильтрации», «каналы быстрого транспорта воды» [3], что близко по смыслу, но говорит об отсутствии единого понятия. А.С. Трофимов объясняет высокую скорость движения индикатора от нагнетательных скважин к добывающим наличием каналов низкого фильтрационного сопротивления [4], но не раскрывает их физическую природу.

По мнению авторов данной статьи, каналы низкого фильтрационного сопротивления в терригенном пласте — это техногенные трещины, образованные в результате авто-гидравлического разрыва пласта (ГРП). Представления о формировании сквозных техногенных трещин авто-ГРП, описанные авторами [5], позволяют иначе взглянуть на результаты исследований. По сути, исследователи говорят об избирательном механизме движения индикатора в пористой среде, и трещина описывает физическую сущность явления.

Изыскания фиксируют схожие явления, которым исследователями даются разные объяснения:

- высокая скорость движения индикатора к отдельным скважинам;
- неравномерное по площади распространение количества индикатора между равноудаленными скважинами;
- пики концентрации индикатора в отбираемых пробах воды.

Характерная для поровой среды скорость фильтрации составляет не более 2 м/сут. Высокие скорости движения меченых вод объясняют наличием высокопроницаемого пропластка в разрезе или недонасыщением коллектора. Ведь исследования проводятся на месторождениях, где наблюдается опережающая динамика обводнения скважин.

Моделирование распространения индикатора [6] показало, что задания высокопроницаемого слоя недостаточно. Недонасыщение пласта и фазовое проницаемости, благоприятные для движения воды в модели, уже при вводе скважины дают высокую входную обводненность, что не наблюдается по факту.

В модели вода с индикатором движется оторочкой. Тогда индикатор должен фиксироваться последовательно в добывающих скважинах по мере удаления от нагнетательной с концентрацией тем меньшей, чем дальше расположена скважина. На практике появление индикатора иногда не отмечается в ближайших скважинах, при этом он появляется в удаленных, как, например, на объекте АВ₁₋₂ «рябчик»

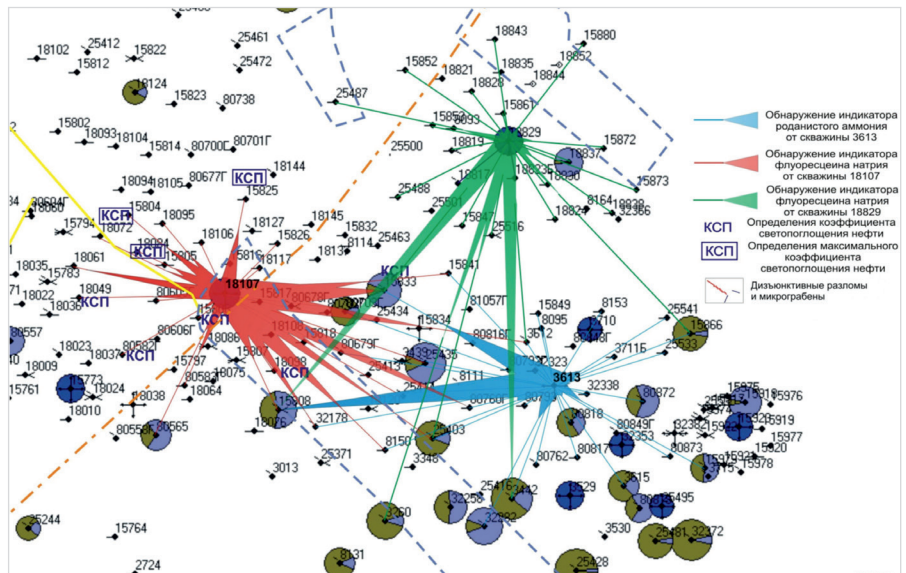


Рис. 1. Роза-диаграмма скоростей индикаторов
Fig. 1. Rose-chart of indicator speeds

Самотлорского месторождения (рис. 1). Поступление индикатора в добывающие скважины при моделировании имеет один максимум при прохождении фронта, а дальше концентрация индикатора в попутной воде снижается — в итоге масса индикатора, извлеченная по расчету из реагирующих скважин, убывает от расстояния. Но на Кальчинском месторождении из скв. X08 отобрано 44 и 69 % закачанного в скв. X22 и X02 индикатора, что на порядок выше скважин окружения. При исследовании на Талинском лицензионном участке (ЛУ) масса отобранного из одной добывающей скважины индикатора доходит до 80 % от массы закачанного. Воспроизвести такие результаты в модели возможно задав сквозную трещину, иначе индикатор рассеивается в пористой среде [6].

Вывод о сквозной трещине при гидропрослушивании сделан авторами [7]. На основе моделирования показано, что в пласте с проницаемостью 1 мД поровый пласт между трещиной авто-ГРП и призабойной зоной добывающей скважины не позволяет смоделировать зафиксированное возмущение. Отклик воспроизводится при условии сквозной трещины.

Показателен факт, зафиксированный протоколом заседания ТКР ХМАО от 16.03.2000 г. № 132. В декабре 1997 г. на Западно-Асомкинском месторождении в скв. № 147 и 173 объекта ЮС, был закачан индикатор. Зафиксирована скорость движения индикатора от 16,3 до 197 м/час [4]. Снижения обводненности продукции в нагнетательные скважины закачан водный раствор

гипса. В соседних добывающих скважинах, находящихся на расстоянии 500 м, через непродолжительное время лопатки установок электроприводного центробежного насоса (УЭЦН) были заклинены отложениями гипса, что вызвало остановку добычи. Отказ был вызван заклиниванием лопаток секций насоса отложениями гипса. Похожий случай зафиксирован на Самотлорском месторождении. Закачка волокнисто-дисперсной смеси выполнена в нагнетательные скважины элемента № 6 объекта АВ₃+АВ₂₋₃. Через 45 суток реагенты были получены из скважин № 16236, 16238, 16193, расположенных на расстоянии 825 м, чем вывели УЭЦН в них из строя [8].

Очевидно, что фильтрация дисперсного раствора гипса и волокнисто-дисперсных смесей по поровой среде невозможна. Это является прямым подтверждением, что быстрое прохождение индикатора, а затем и реагентов от нагнетательных скважин к добывающим произошло по трещинам.

Индикатор вводят в нагнетательную скважину в один прием, а его поступление в добывающие скважины фиксируется в виде отдельных порций (пиков) высокой концентрации. Между пиками фиксируются пробы, в которых индикатор не выявлен. Количество пиков различно и может достигать 15, как, например, на Кальчинском месторождении [9]. Это превышает число пропластков, выявляемых по ГИС, из чего следует, что слоистость разреза не объясняет движение трассера [6].

Порционность поступления индикатора наталкивает на вывод, что его движение происходит разными путями. Так может быть,

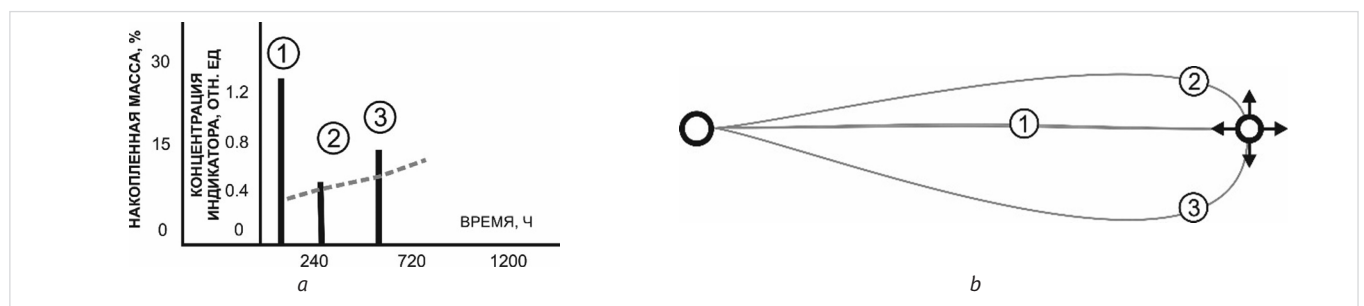


Рис. 2. Порционность индикатора в пробах — а; идеализированное представление, объясняющее природу пиков концентрации — б
Fig. 2. The portionality of the indicator in the samples — а; an idealized representation explaining the nature of the concentration peaks — б

когда в пропластке (или нескольких) между добывающей и нагнетательной скважинами находится несколько трещин. Самая первая порция соответствует трещине, соединяющей скважины по кратчайшему расстоянию. На рисунке 2 показано идеализированное представление системы трещин, удобное для понимания. Отдельные авторы считают, что система трещин развивается не от забоя скважины, а от центральной трещины, совпадающей с главной линией тока. Объяснение поступления индикатора в виде порций, но в представлении системы цилиндрических каналов низкого фильтрационного сопротивления предлагают авторы в работе [10].

Пример: закачка индикатора в скважину Х57 Кальчинского месторождения в 2005 и 2006 гг. (рис. 3). В 2005 г. индикатор в скв. Х58 зафиксирован 11 сопоставимыми порциями с суммарной долей отобранного индикатора 34,7 %.

В 2006 г. отбор жидкости по скв. Х58 интенсифицирован. Дебит воды вырос с 123 до 223 куб. м/сут. С первой порцией поступило около 30 % индикатора, а последующие имели концентрацию и долю индикатора ниже. Снижение скорости поступления первой порции с увеличением количества индикатора может свидетельствовать об увеличении раскрытости трещины, совпадающей с главной линией тока. В работе по обобщению результатов трассерных исследований в Западной Сибири [4] отмечается увеличение во времени сечения основного канала низких фильтрационных сопротивлений (НФС), сопровождающееся выносом механических примесей.

Таким образом, исследования выявляют систему техногенных трещин в пласте. По мере нагнетания воды происходит «старение» системы трещин.

При проведении и интерпретации результатов трассерных исследований принята методика СевКавНИПИнефть [11] на основе модели слоисто-неоднородного коллектора. Вывод о движении меченой воды по системе техногенных трещин позволяет иначе взглянуть на интерпретацию результатов исследований и выполнить оценку параметров трещин.

Средняя скорость для одномерного движения жидкости по прямолинейной трещине

раскрытостью δ (м) и протяженностью l (м) определяется формулой Буссинеска:

$$v = \frac{\delta^2 \Delta P}{12\mu l}, \quad (1)$$

где μ — вязкость, Па*с; ΔP — перепад давления, Па.

С другой стороны, скорость движения v может быть определена как отношение протяженности ко времени движения t :

$$\frac{l}{t} = \frac{\delta^2 \Delta P}{12\mu l}. \quad (2)$$

Отсюда получим связь длины трещины l , раскрытости и времени движения индикатора:

$$l = \delta \sqrt{\frac{\Delta P}{12\mu} t}. \quad (3)$$

Формула (3) с приемлемой для экспресс-оценки точностью может быть использована для определения параметров трещин по результатам трассерных исследований.

Рассчитаем параметры трещин на примере результатов исследований объекта БВ8 Мыхайского месторождения [12]. Закачка индикатора выполнена в скв. Х52 и Х89. Скважины работали с приемистостью порядка 1 000 куб. м/сут. Анализ проб на содержание индикатора проводили в 37 скважинах. Поступление зафиксировано в 11 из них, отстоящих от скв. Х89 на расстоянии от 950 до 1 700 м по истечении от 1 до 71 часа с момента закачки. Скорость движения индикатора в диапазоне от 46 до 6 194 м/час.

В скв. Х16, находящейся от скв. 45 на расстоянии $L_1 = 1700$ м, время появления первой порции индикатора t_1 составило 24,1 часа. Перепад давления в процессе исследований составил 134 атм, вязкость воды в пластовых условиях 0,44 сПз. Это дает раскрытость трещины $\delta = 0,11$ мм. Полученная величина близка к оценке от 0,1–0,5 мм, даваемой исследователями для незакрепленной трещины гидроразрыва породы водой, по результатам лабораторных и промысловых исследований. Примем эту оценку как среднюю для всех трещин в этой скважине.

Позднее в скв. Х16 наблюдались еще два пика роданистого аммония: через

$t_2 = 33$ и $t_3 = 48$ часов после закачки индикатора. Тогда длины трещин определяются из формулы 3 с учетом полученного значения δ выражением $L_2=1 971$ м, $L_3=2 377$ м. При этом можно считать эти значения минимальными в предположении, что каналы представляются трещиной с раскрытостью 0,11 мм каждый.

Рассчитав длину трещин, оценим объем, приняв высоту трещины равной толщине коллектора для монолитного объекта. Для расчлененного объекта целесообразно привлечение материалов промыслово-геофизических исследований (ПГИ) и ГРП. В рассматриваемом примере при высоте трещины 12 м и по рассчитанным параметрам, приняв сечение прямоугольным, получаем: $V_1=2,2$ куб.м, $V_2=2,6$ куб.м, $V_3=3,1$ куб.м.

Суммарный объем системы трещин от нагнетательной скважины позволяет оценить требуемый объем и состав для водоизоляционных работ. Знание раскрытости трещин позволяет подобрать размер дисперсных частиц и рассчитать давления, требуемые для продавки.

Отметим, что проведение водоизоляционных работ с последующим возобновлением закачки воды при давлении достаточном для гидроразрыва породы после деградации изолирующих составов приводит к увеличению количества и объема системы трещин [13].

Итоги

Авторами предложена своя версия концепции распространения индикатора в терригенном пласте по техногенным трещинам авто-ГРП. Предложен способ расчета параметров трещин с целью планирования изоляционных работ.

Выводы

- Высокая скорость распространения индикатора (сотни метров в сутки) в объеме поровой среды может быть объяснена течением меченой жидкости по трещинам авто-ГРП.
- Поступление индикатора с высокой для поровой среды скоростью в группу добывающих скважин при трассерных исследованиях может быть свидетельством их сообщения с системой трещин авто-ГРП, образованной исследуемой

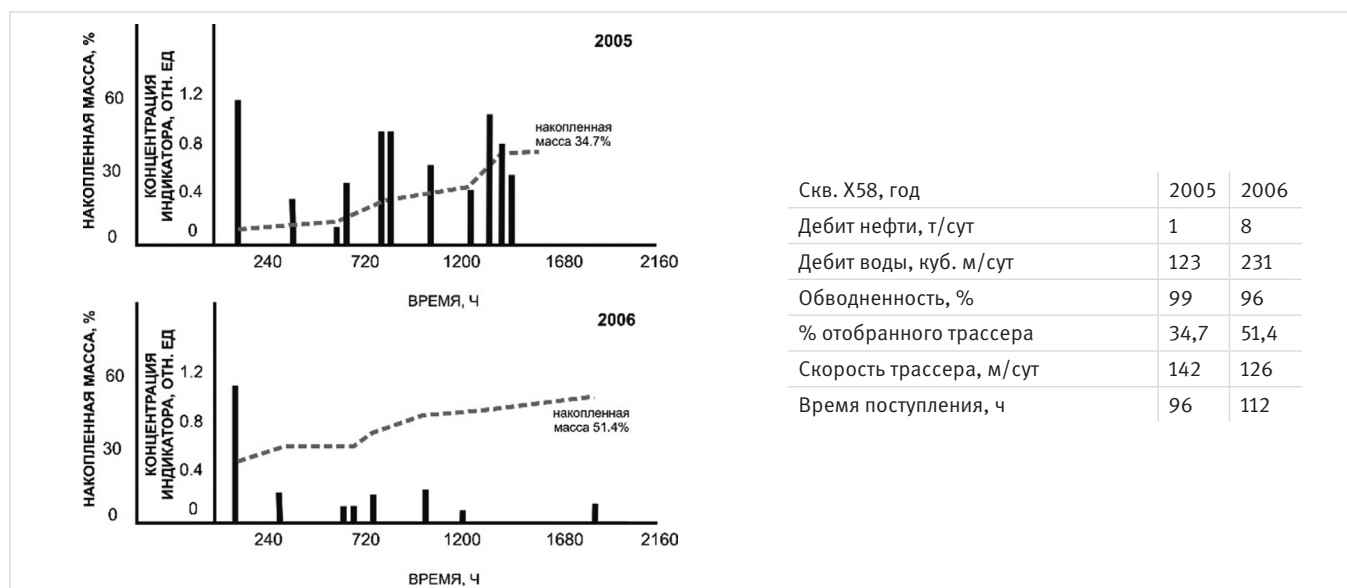


Рис. 3. Пример «старения» системы трещин
Fig. 3. An example of the “aging” of a crack system

нагнетательной скважиной. Это понимание может служить дополнительным инструментом при совершенствовании системы заводнения.

- Результаты исследований позволяют выполнить экспертную оценку параметров системы трещин.

Литература

- 1 Соколовский Э.В., Соловьев Г.Б., Тренчиков Ю.И. Индикаторные методы изучения нефтегазовых пластов. М.: Недра, 1986. 157 с.
- 2 Соколовский Э.В. Теория и практика применения индикаторных методов при фильтрационных исследованиях и разработке нефтяных месторождений. М.: 1971. 360 с.
- 3 Кашик А.С., Билибин С.И., Ахалкин М.Ю., Клепацкий А.Р. Оптимизация системы заводнения с технологией селективной изоляции и нейтрализации каналов быстрого транспорта воды // Нефтяное хозяйство. 2008. № 3. С. 36–39.
- 4 Трофимов А.С. и др. авторы. Обобщение индикаторных (трассерных) исследований на месторождениях Западной Сибири // Территория нефтегаз. 2006. № 12.

С. 72–77.

- 5 Изотов А.А. Афонин Д.Г. О техногенной трансформации продуктивных пластов вследствие повышенного давления нагнетания при заводнении // Нефтегазовое дело. 2021. № 5. С. 18–25.
- 6 Саников В.А. Курочкин В.И., Чертенков М.В. Мониторинг гидродинамических и трассерных исследований // Нефтяное хозяйство. 2013. № 7. С. 104–107.
- 7 Давлетбаев А.Я., Нуриев Р.И. Моделирование гидропрослушивания в скважинах с вертикальными техногенными магистральными трещинами гидроразрыва // Труды института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2012. Т. 9. № 2. С. 43–46.
- 8 Бодрягин А.В. Регулирование процессов трещинообразования при закачке воды в пласт (на примере пласта $AB_3^1+AB_{2,3}$ Самотлорского месторождения). Тюмень: 2001. 156 с.
- 9 Кайгородов С.В., Кашапова Э.Р., Киришин В.Т., Павлова С.А. Оптимизация системы заводнения на месторождении на поздней стадии разработки с помощью модели линий тока // Конференция «Геология и разработка месторождений

с трудноизвлекаемыми запасами».

- Геленджик. 2012. 18–21 сентября.
- 10 Коротенко В.А. Грачев С.И., Кряквин А.Б. Интерпретация результатов трассерных исследований с учетом конвективного массопереноса // Записки горного института. 2019. Т. 236. С. 185–193.
- 11 Соколовский Э.В., Зайцев В.И., Антонов Г.П. Методическое руководство по технологии проведения индикаторных исследований и интерпретации их результатов для регулирования и контроля процесса заводнения нефтяных залежей. Грозный: СевКавНИПИнефть, 1989. 87 с.
- 12 Трофимов А.С., Артамонова Г.Н. Трассерные исследования на месторождениях НГДУ «Черногорнефть» // Фонды Нижневартовск НИПИнефть. 1992. 142 с.
- 13 Ручкин А.А., Ягафаров А.К. Оптимизация применения потокоотклоняющих технологий на Самотлорском месторождении. Тюмень: Вектор Бук, 2004. 165 с.

ENGLISH

Results

The authors have proposed their own version of the concept of the indicator propagation in a terrigenous formation through technogenic cracks of an auto-hydraulic fracturing. A method for calculating the parameters of cracks for the purpose of planning insulation works is proposed.

Conclusions

- The high speed of the indicator propagation (hundreds of meters per day) in the volume of the pore medium can be explained by the

flow of the labeled liquid through the cracks of the auto-fracturing.

- The arrival of an indicator with a high velocity for the pore medium in a group of producing wells during tracer studies may be evidence of their communication with the system of auto-fracturing fractures formed by the injection well under study. This understanding can serve as an additional tool for improving the flooding system.
- The results of the research allow us to perform an expert assessment of the parameters of the crack system.

References

- 1 Sokolovsky E.V., Solovoyov G.B., Trenchikov Yu.I. Indicator methods for studying oil and gas reservoirs. Moscow: Nedra, 1986, 157 p. (In Russ).
- 2 Sokolovsky E.V. Theory and practice of using indicator methods in filtration research and development of oil fields. Moscow, 1971, 360 p. (In Russ).
- 3 Kashik A.S., Bilibin S.I., Akhalkin M.Yu., Klepatsky A.R. Optimization of waterflooding system with technology of selective isolation and neutralization of fast water transport channels. Oil Industry, 2008, issue 3, P. 36–39. (In Russ).
- 4 Trofimov A.S. et al. authors. Generalization of indicator (tracer) studies at the deposits of Western Siberia. Territory of Neftegaz, 2006, issue 12, P. 72–77. (In Russ).
- 5 Izotov A.A. Afonin D.G. The technogenic transformation of productive formations due to the increased discharge pressure during flooding. Oilfield engineering, 2021, issue 5, P. 18–25. (In Russ).
- 6 Sannikov V.A. Kurochkin V.I., Chertenkov M.V. Monitoring of hydrodynamic and tracer tests. Neftyanoe khozyaystvo, 2013, issue 7, P. 104–107. (In Russ).
- 7 Davletbaev A.Ya., Nuriev R.I. Modeling of hydraulic listening in wells with vertical technogenic main fractures of hydraulic fracturing. Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics, 2012, Vol. 9, issue 2, P. 43–46. (In Russ).
- 8 Bodryagin A.V. Regulation of crack formation processes during water injection into the reservoir the example of AB_3^1 and $AB_{2,3}$ formations of Samotlor oil field Tyumen, 2001, 156 p. (In Russ).
- 9 Kaygorodov S.V., Kashapov E.R., Kirshin V.T., Pavlova S.A. Optimization of a waterflood system in a late stage field using a streamline model. Conference “Geology and development of fields with hard-to-recover reserves”, Gelendzhik, 2012, 18–21 September.
- 10 Korotenko V.A., Grachev S.I., Kryakvin A.B. Interpretation of the tracer investigation results considering convective mass transfer. Journal of Mining Institute, Vol. 236, P. 185–193. (In Russ).
- 11 Sokolovsky E.V., Zaytsev V.I., Antonov G.P. The methodical guide to technology of carrying out indicator researches and interpretation of their results for regulation and control of process of flooding of oil pools. Grozny: SevKavNIPIneft, 1989, 87 p. (In Russ).
- 12 Trofimov A.S., Artamonova G.N. Tracer studies at the fields of NGDU “Chernogorneft”. Funds NizhnevartovskNIPIneft, 1992, 142 p. (In Russ).
- 13 Ruchkin A.A., Yagafarov A.K. Optimization of the application of flow-bending technologies at the Samotlorskoye field Tyumen: Vektor Buk, 2004, 165 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Изотов Алексей Александрович, руководитель проектного офиса по технологическому развитию, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия
Для контактов: aaizotov@tnnc.rosneft.ru

Izotov Alexey Aleksandrovich, head of the project office for technological development, “Tyumen oil research center” LLC, Tyumen, Russia
Corresponding author: aaizotov@tnnc.rosneft.ru

Афонин Денис Геннадьевич, старший эксперт, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия
Для контактов: dgafonin@tnnc.rosneft.ru

Afonin Denis Gennadievich, senior expert, “Tyumen oil research center” LLC, Tyumen, Russia
Corresponding author: dgafonin@tnnc.rosneft.ru