

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.96-109>

EDN HFKOХK

УДК 622.276.001.5

## **Контроль над зонами фильтрации и коэффициентом охвата на основе трассерных исследований межскважинного пространства**

*Будкевич Р.Л., Белова Т.Т., Аленькин И.А.*

*ГБОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет» - «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия*

## **Control over filtration zones and coverage coefficient based on tracer studies of the interwell space**

*R.L. Budkevich, T.T. Belova, I.A. Alenkin*

*Almetyevsk State University of Technology – Higher Petroleum School, Almetyevsk, Russia*

**E-mail: budkevichrl@yandex.ru**

**Аннотация.** Для обеспечения рациональной разработки и выбора наиболее эффективного способа воздействия на пласт, важно не только выявлять зоны фильтрации и определять их проводимость, но и оценивать активности этих путей, фиксируя те участки (зоны), которые при существующей системе повышения пластового давления (ППД) остаются либо слабо активными, либо неактивными. Само по себе наличие таких участков обуславливает неэффективное поддержание энергетического состояния залежи и отрицательно сказывается на коэффициенте охвата нефтяных пластов. Однако в таких зонах пласта, которые не охвачены заводнением, могут оставаться не выработанные запасы нефти. По результатам работы установлено, что наличие неактивных зон определяются за счет трассерных исследований залежи на основании низкой концентрации трассера, продолжительного его выхода и корреляции динамики его выноса с движением индикатора в фильтрационной модели; для идентификации наличия трассера и проведения достоверной интерпретации требуется съемка спектра для исключения возможности отнесения естественных колебаний (шума) к сигналам индикатора; для повышения точности идентификации трассера при снятии спектра рекомендуется регулировать значение рН раствора в зависимости от типа используемого люминесцентного трассера.

**Ключевые слова:** трассерные исследования, флуоресцеин, углеродные квантовые точки (УКТ), эколого-гидрогеологические исследования, исследования с использованием маркеров

**Для цитирования:** Будкевич Р.Л., Белова Т.Т., Аленькин И.А. Контроль над зонами фильтрации и коэффициентом охвата на основе трассерных исследований межскважинного пространства // Нефтяная провинция.-2024.-№3(39).-С. 96-109. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.96-109>. - EDN HFKOXX

**Abstract.** To ensure the rational development and selection of the most effective method of influencing the formation, it is important not only to identify filtration zones and determine their conductivity, but also to assess the activity of these pathways, fixing those areas (zones) that remain either weakly active or inactive under the existing reservoir pressure increase system (PPD). By itself, the presence of such sites causes inefficient maintenance of the energy state of the deposit and negatively affects the coverage ratio of oil reservoirs. However, in such areas of the reservoir that are not covered by flooding, there may be undeveloped oil reserves. According to the results of the work, it was found that the presence of inactive zones is determined by tracer studies of the deposit based on the low concentration of the tracer, its prolonged output and the correlation of the dynamics of its removal with the movement of the indicator in the filtration model; to identify the presence of the tracer and conduct a reliable interpretation, a spectrum survey is required to exclude the possibility of attributing natural fluctuations (noise) to the indicator signals; to increase the accuracy of tracer identification when removing the spectrum, it is recommended to adjust the pH value of the solution depending on the type of luminescent tracer used.

**Key words:** tracer studies, fluorescein, carbon quantum dots (UCTS), ecological and hydrogeological studies, studies using markers

**For citation:** R.L. Budkevich, T.T. Belova, I.A. Alenkin Kontrol' nad zonami fil'tratsii i koeffitsiyentom okhvata na osnove trassernykh issledovaniy mezhskvazhinного prostranstva [Control over filtration zones and coverage coefficient based on tracer studies of the interwell space]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(39), 2024. pp. 96-109. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.96-109>. EDN HFKOXX (in Russian)

## Введение

В основе эффективной разработки нефтяных месторождений лежит большой объем комплексной геолого-геофизической и промысловой информации, недостаточность или недостоверность которой не позволяет достичь требуемого уровня выработки запасов. Наиболее важным и значимым аспектом выбора принципа воздействия на пласт является достоверная гидродинамическая картина участка разработки: направление фильтрацион-

ных потоков, коэффициенты влияния нагнетательных скважин, обозначение зон массопереноса жидкости, активность каналов/зон фильтрации, наличие не дренируемых зон и т.д.

Одним из наиболее эффективных способов получения требуемой информации, являются трассерные исследования межскважинного пространства. Маркировка закачиваемой воды специальными трассерами с последующим их отслеживанием в продукции добывающих скважин позволяет выявить и оценить распределение фильтрационных потоков, а также определить фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) каналов/зон, по которым осуществляется фильтрация жидкости.

Трассерные исследования позволяют определить наличие или отсутствие гидродинамической связи между нагнетательными и добывающими скважинами, оценить скорость движения закачиваемой жидкости по пластам и проницаемость тех продуктивных интервалов, по которым происходит фильтрация. На основании этой информации могут быть получены такие данные, как объем той части пласта, где идет фильтрация нагнетаемой жидкости и ее вклад в обводненность как отдельных скважин, так и участков нефтяной залежи.

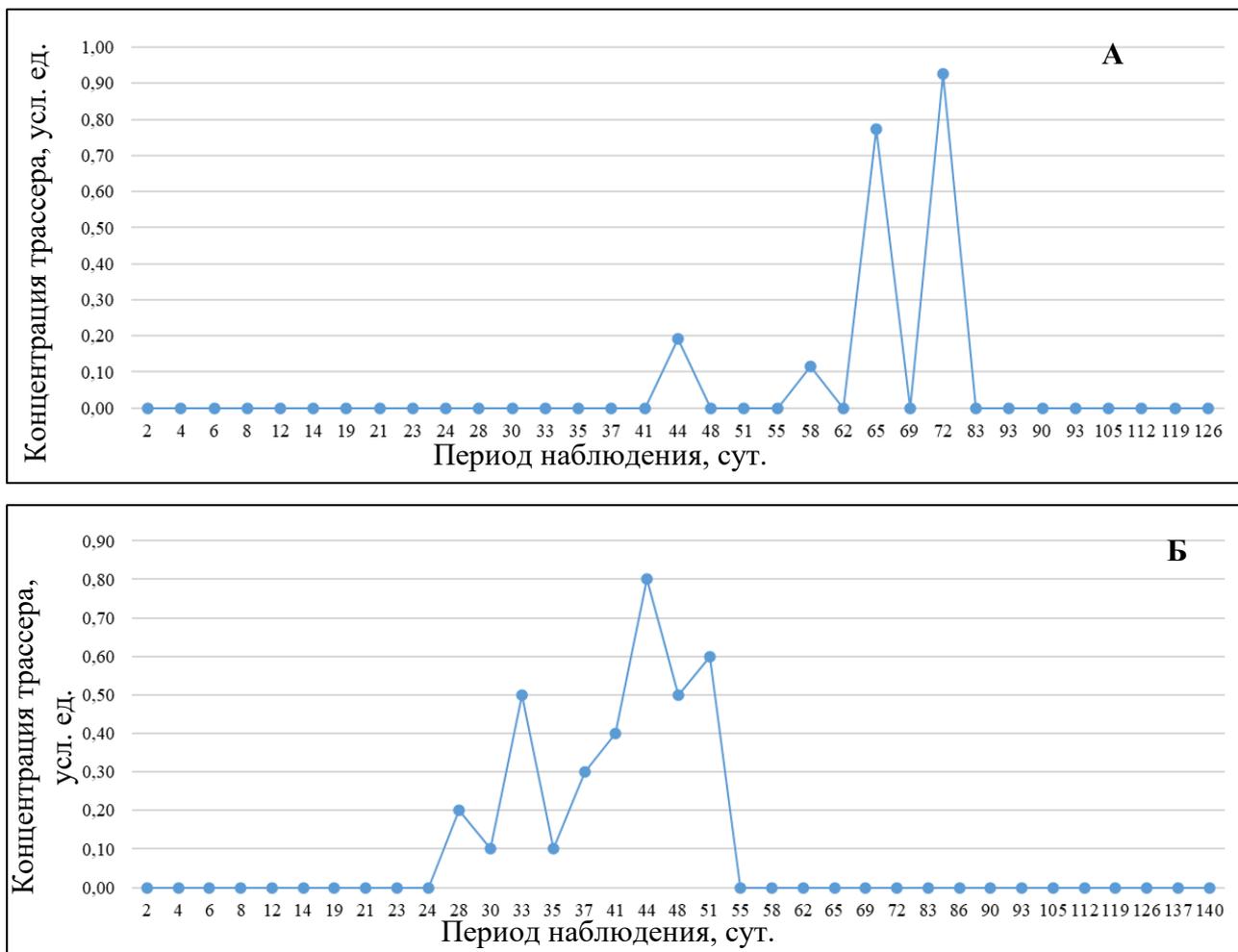
Для обеспечения рациональной разработки и выбора наиболее эффективного способа воздействия на пласт, важно не только выявлять зоны фильтрации и определять их проводимость, но и оценивать активности этих путей, фиксируя те участки (зоны), которые при существующей системе повышения пластового давления (ППД) остаются либо слабо активными, либо неактивными. Само по себе наличие таких участков обуславливает неэффективное поддержание энергетического состояния залежи и отрицательно сказывается на коэффициенте охвата нефтяных пластов. Однако в таких зонах пласта, которые не охвачены заводнением, могут оставаться не выработанные запасы нефти. Следовательно, информация об их наличии явля-

ется чрезвычайно важной как с позиции выработки запасов и эффективности разработки месторождения в целом, так и в плане выбора адресного метода увеличения нефтеотдачи (МУН) конкретно для данного участка залежи. Наличие подобных неактивных областей преимущественно может быть обусловлено близостью нагнетательного фонда к приконтурной области. Идентификация таких зон успешно осуществляется на основе результатов трассерных исследований.

Проведение индикаторных исследований включает несколько этапов. После выбора нагнетательных скважин, в которые будет производиться закачка индикатора, и определения его объема для нагнетания в скважину, в пласт закачивается меченная жидкость. Содержание индикатора фиксируется в скважинной продукции добывающих скважин относительно данных предварительного фонового отбора жидкости до закачки трассеров. Периодический отбор и анализ воды из скважин позволяет собрать и проинтерпретировать данные о скоростях и объемах поступления меченой жидкости, на основании чего определяются характер гидродинамической связи, ФЕС и другие параметры пласта, указанные выше.

Характер выноса индикатора полностью зависит от зоны фильтрации пласта, по которой он осуществлял движение в добывающую скважину – от размеров этой зоны, ее ФЕС, степени извилистости фильтрационных каналов. Также на движение индикатора по пласту и его поступление в добывающую скважину влияет минеральный состав пород. Принято считать, что проявление единичных сигналов трассера свидетельствуют о наличии в пласте нескольких отдельных гидродинамических каналов связи между нагнетательной и добывающей скважинами, движение жидкости по которым идет с различной скоростью, о чем говорит периодическое появление трассера в добываемой жидкости. Это указывает на неоднородность продуктивного пласта и на различные ФЕС слагающих его прослоев.

Продолжительный вынос индикатора, коррелирующийся с моделью его движения в фильтрационный трубке, указывает на наличие в данном участке залежи хорошей проницаемости всего пласта или его интервала, по которым осуществляется значительный либо основной массоперенос жидкости (Рис. 1).



**Рис. 1. Фиксация единичных гидродинамических каналов (А) и объемного пласта фильтрации по результатам трассерных исследований (графики выноса индикатора без математической обработки)**

Форма графика выхода индикатора является важным критерием при интерпретации результатов исследований и характеризует продуктивный пласт, по которому происходит движение жидкости. Объем и скорость выхода индикатора в свою очередь указывают на активность фильтрации и соответственно на ФЕС исследуемого продуктивного пласта.

Для фиксации выхода в добывающие скважины наибольшей части закачанного трассера требуется достаточно продолжительное время (до 2-х до 4-х лет), что часто не удовлетворяет требованиям недропользователя, заинтересованного в скорейшем получении результатов и в оперативном принятии соответствующих решений. Именно поэтому наибольшая часть трассерных тестов направлена на изучение причин опережающего обводнения и поиск каналов низкого фильтрационного сопротивления, которые могут быть выявлены в течение 4-8 месяцев наблюдения.

В течение относительно непродолжительного периода тестирования (до года) фиксация основных зон фильтрации пласта возможна в случае естественно высокой проницаемости слагающих его пород-коллекторов. При этом для оптимизации проведения трассерных исследований, целесообразно проводить не абсолютную оценку активности каналов, основываясь на выходе большей части закачанного трассера (на что, как уже было указано, уходит значительный период времени), а оценивать активность относительно среднего уровня выхода трассера по участку исследования за выбранный период наблюдения.

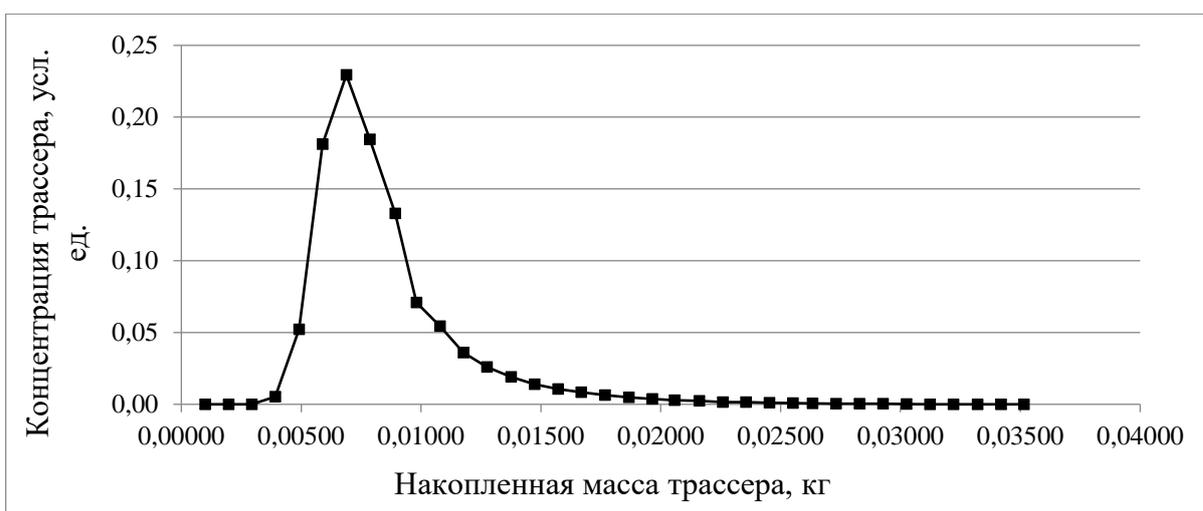
В случае наличия на участке исследований активных путей фильтрации, выделить неактивную область путем сравнения показателей со средними значениями участка, не является сложной задачей и выполняется в рамках стандартной интерпретации после окончания исследований.

Более серьезным вызовом является случай, когда на участке полностью отсутствует активная фильтрация, причиной чего может являться почти полный уход закачиваемой жидкости, например, в законтурную область, в нецелевой пласт, а также по разрывному нарушению или по зоне трещиноватости за пределы исследуемого пласта. В этом случае крайне важной и первоочередной задачей является обнаружение причины отсутствия такой активности, которая может быть обусловлена, преимущественно, геологическими причинами – выклиниванием пласта-коллектора

или его замещением на низкопроницаемые породы, а также наличием зоны открытой трещиноватости (по которой закачиваемая жидкость уходит в нецелевые интервалы разреза). Поскольку причины отсутствия активной фильтрации определяют выбор различных методов воздействия на пласт для повышения эффективности системы ППД, точное выявление первопричины недостаточной эффективности закачки является крайне важной задачей.

При интерпретации результатов выхода индикатора на отсутствие между нагнетательной и добывающей скважинами активной фильтрации указывает одновременное наличие следующих основных факторов:

- малая концентрация выхода индикатора, не характерная для значительной доли массопереноса жидкости;
- продолжительный период выноса трассера (несколько десятков суток);
- сходимость (корреляция) формы кривой на графике выноса трассера с формой кривой на графике движения жидкости в фильтрационный трубке (Рис. 2).



**Рис. 2. График выхода индикатора в фильтрационной модели коллектора**

В этом случае результаты исследований во многом определяются корректностью и правильностью интерпретации формы кривой на графике, отражающей характер выхода индикатора в добывающей скважине.

Величина максимальных значений, а также ширина области пика на графике указывают на проводящие свойства среды и на скорость продвижения жидкости с трассером. А именно: чем выше скорость фильтрации – тем меньше интервал между началом и окончанием фиксации трассера (ширина пика, область максимальных значений). Однако, следует учитывать, что именно эта общая форма свидетельствует также о ламинарном движении жидкости при фильтрации. Стоит учесть, что быстрое движение индикатора по условной горизонтальной трещине или по хорошо промытой зоне пласта также будет отображаться в виде кривой, представленной на графике, однако ее объемы и проводящие параметры (проницаемость, производительность) не будут указывать на значительный массоперенос при наличии и использовании критерия продолжительности выноса трассера (несколько десятков суток). Наличие данного критерия исключает отнесение небольшого канала фильтрации к основной проницаемой части пласта-коллектора.

Следующим этапом интерпретация результатов трассерных исследований является оценка массы извлеченного индикатора. В процессе интерпретации результатов исследований все характеристики тестируемого продуктивного пласта (в т.ч. объем фильтрационных каналов) рассчитываются на основании доли вынесенного трассера. Например – чем больше доля выхода трассера, тем больше значения ФЕС пласта и суммарный объем его проводящих каналов. Однако это условия действует только в случае, когда движения основного объема закачиваемой жидкости происходит преимущественно по пласту-коллектору.

Если же при проведении трассерных исследований вся вода, содержащая индикатор, либо основная доля ее объема уходят в нецелевую зону, а в

изучаемый пласт попадает лишь незначительная часть трассера, его дальнейшее продвижение по пласту будет обусловлено, прежде всего, не поршневым воздействием от закачиваемой воды, а естественными динамическими процессами в пласте. В этом случае провести корректный расчет объема, ФЕС и других параметров пласта только на основании данных по объему закачки в нагнетательную скважину не представляется возможным, поскольку интерпретация результатов трассерных исследований происходит с использованием входных данных по суточным/месячным объемам закачки воды.

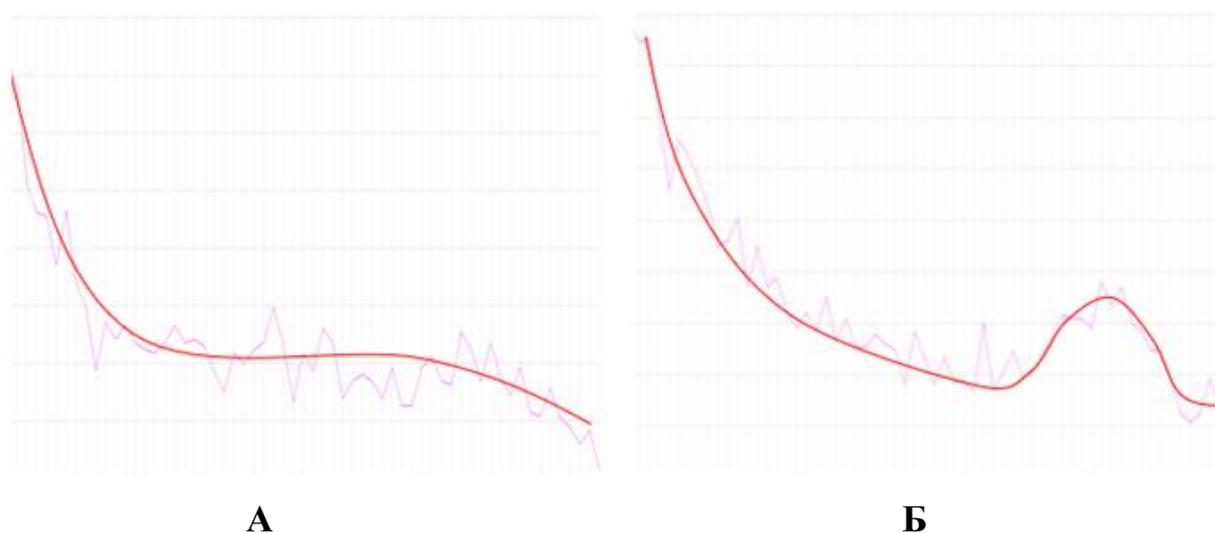
Таким образом, крайне малый выход индикатора при наличии указанных выше двух других критериев, будет говорить о попадании незначительного объема трассера в основной пласт и об уходе основной/значительной части закачиваемого агента в нецелевую зону. Этот фактор наличия большого фильтрационного пласта/пропластка при отсутствии полноценного его вовлечения в разработку будет свидетельствовать о незначительной активности изучаемой части пласта ввиду недостаточной эффективности существующего режима ППД и в то же время говорить о его потенциальной эффективности при дальнейшей разработке (в том случае, если будут найдены способы ликвидации зон ухода жидкости в нецелевую область).

Для полноценной и достоверной реализации обозначенного подхода требуются точные данные о выходе индикатора, которые могут находиться в самых минимальных пределах (в т.ч. на пороге обнаружения прибора), что также является осложняющим фактором при проведении трассерного тестирования. Считается, что используемый при трассерных исследованиях люминесцентный индикатор, обладает крайне низким пределом обнаружения, что позволяет зафиксировать даже незначительное его присутствие в анализируемой пробе. Однако этот фактор преимущественно реализуется при проведении измерений в дистиллированной воде, предел обнаружения в этом случае составляет  $10^{-7}$  г/см<sup>3</sup>. Это обусловлено отсутствием различных

примесей и ионов металлов в анализируемом растворе. Пластовая вода, наоборот, является средой с большим количеством различных компонентов, создающих люминесцентное тушение посторонними веществами, и может иметь либо химический, либо физический характер [1]. Таким образом, фиксация минимальных концентраций трассера в пробах пластовых вод существенно осложнена, в т.ч. ввиду наличия динамики в пласте и, как следствие, постоянного изменения концентрации присутствующих в воде (мешающих детектированию трассера) компонентов.

С целью минимизации этого фактора, при проведении трассерных исследований, проводят предварительный мониторинг фоновое спектрального состояния вод, выделяют среднее значение интенсивности люминесценции в анализируемой области без присутствия индикатора и устанавливают базовый уровень, превышение которого свидетельствует о наличии индикатора в анализируемой пробе. В случае наличия уверенного высокого выноса трассера незначительные превышения установленного базового уровня принимаются за естественные колебания и не используются при интерпретации, т.к. их учет не несет ощутимого изменения результатов исследований (погрешность составляет менее 1 %). Однако при отсутствии такого значительного выноса индикатора фактор незначительного превышения установленного базового уровня становится более критическим, т.к. отсутствие его учета может привести к недостоверному выводу об отсутствии гидродинамической связи, и задача определения неактивной области пласта будет оставаться не решенной. Отмечается, что существуют несколько видов индикаторов, используемых при трассерных исследованиях [2], которые обладают различными свойствами и методами определения, однако наиболее используемыми на участках ПАО «Татнефть» являются люминесцентные трассеры (вследствие их экономичности и наименьших трудозатрат). Помимо особенностей пробоподготовки анализируемых проб, которая

включает в себя процесс высаживания ионных металлов и посторонних примесей, снижающих точность детектирования, проводится последовательная съемка спектра анализируемых вод, имеющих незначительное превышение установленного базового спектрального уровня люминесценции для подтверждения наличия/отсутствия трассера в пробе. Присутствие искомого индикатора будет определяться характерным спектром (как в зоне поглощения, так и в зоне регистрации), в то время как высокое значение фона, которое может давать ложный сигнал наличия трассера, не будет создавать форму спектра, характерную для используемых люминесцентных красителей (Рис. 3).



**Рис. 3. Спектр жидкости без индикатора (А) и в присутствии индикатора (Б)**

Таким образом, в случае наличия большого количества околонулевых значений концентрации трассера, которые в отдельных случаях можно принять за колебания фона, необходимо проводить съемку спектра с использованием программного обеспечения, которое позволит идентифицировать причину слабого сигнала (наличие низкой концентрации индикатора в пробе либо скачок фона). Также, ввиду влияния рН раствора на люминесценцию используемых трассеров, при съемке спектров целесообразно регу-

лизовать значение рН раствора (в зависимости от типа используемого трассера), с целью создания наиболее благоприятной среды для обнаружения индикатора и получения более четких спектров.

После проведения верификации и выдачи заключения о наличии индикатора в анализируемых пробах проводится построение графика «концентрация индикатора – время» и, как было указано ранее, если динамика его выхода коррелирует с моделью фильтрации трассера в фильтрационной трубке, формируется заключение об идентификации зон фильтрации, способных осуществлять значительный массоперенос жидкости от нагнетательной скважины, но которые остаются неактивными ввиду почти полного ухода жидкости в нецелевую зону. В этом случае рекомендуется проведение изоляционных работ на нагнетательной скважине с целью блокирования ухода жидкости, либо проведение геофизических исследований для оценки технического состояния скважины, т.к. причиной ухода закачиваемой воды может быть неудовлетворительное техническое состояние скважины. Устранение указанных факторов позволит вовлечь в разработку ранее неохваченные фильтрационные зоны, увеличив коэффициент охвата, и повысить эффективность разработки участка/залежи.

### **Выводы по результатам работы**

1. На участке разработки нефтяных месторождений могут существовать зоны, не охваченные заводнением, но при этом не являющиеся полностью непроницаемыми и недренируемыми. Это снижает коэффициент охвата и качество поддержания энергетического состояния залежи;
2. Наличие неактивных зон определяется за счет трассерных исследований залежи на основании низкой концентрации трассера, продолжительного его выхода и корреляции динамики его выноса с движением индикатора в фильтрационной модели;

3. Для идентификации наличия трассера и проведения достоверной интерпретации требуется съемка спектра для исключения возможности отнесения естественных колебаний (шума) к сигналам индикатора;

4. Для повышения точности идентификации трассера при снятии спектра рекомендуется регулировать значение рН раствора в зависимости от типа используемого люминесцентного трассера.

*Научная работа выполнена в рамках договора № 0750/2023/2531.*

### Список литературы

1. Антонов Г.П., Абрамов М.А., Кубарев П.Н. Проведение трассерных исследований для контроля и регулирования процесса заводнения нефтяных залежей в ОАО «Татнефть» // Инженерная практика. – 2015. – № 5. – С. 56–68.
2. Алов Н.В., Барбалат Ю.А., Гармаш А. Основы аналитической химии. В 2 кн. Кн. 2. Методы химического анализа под ред. Ю.А.Золотова, Том 2, 2004. – 406 с.
3. Камышников А.Г., Зарипов А.Т., Береговой А.Н., Ибатуллин Р.Р., Заиров Р.Р., Довженко А.П. Использование углеродных квантовых точек в качестве трассирующего материала при мониторинге и контроле разработки нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 7. – С. 44.
4. Кубарев П.Н., Камышников А.Г., Кондаков С.В. Применение многоиндикаторного метода исследования межскважинного пространства на объектах ПАО «Татнефть» // Сборник докладов научно-технической конференции, посвященной 60-летию ТатНИПИнефть ПАО «Татнефть», 13–14 апреля 2016 г., г. Бугульма / ПАО «Татнефть». – Набережные Челны: Экспозиция Нефть Газ, 2016. – С. 145–149.
5. Мингазов М.Н., Стриженок А.А., Фатхуллин Р.Р. [и др.]. Опыт применения индикаторных исследований по изучению гидродинамической связи между сакмарскими и верхнепермскими отложениями Ашальчинского месторождения сверхвязких нефтей // Георесурсы. – 2015. – № 1. – С. 29–32.

### References

1. Antonov G.P., Abramov M.A., Kubarev P.N. Conducting tracer studies to control and regulate the flooding of oil deposits in JSC Tatneft // Engineering practice. - 2015. – No. 5. – p. 56-68. (in Russian)
2. Alov N.V., Barbalat Yu.A., Garmash A. Fundamentals of analytical chemistry. In 2 books. Book 2. Methods of chemical analysis, edited by Yu.A.Zolotov, Volume 2, 2004. – p. 406. (in Russian)
3. Kamyshnikov A.G., Zaripov A.T., Beregovoy A.N., Ibatullin R.R., Zairov R.R., Dovzhenko A.P. The use of carbon quantum dots as a tracing material in monitoring and control of oil field development // The oil industry. - 2021. - No. 7. - p. 44. (in Russian)
4. Kubarev P.N., Kamyshnikov A.G., Kondakov S.V. Application of the multi-indicator method of studying the inter-well space at the facilities of PJSC Tatneft // Collection of reports of the scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of TATNIPIneft PJSC Tatneft, April 13-14, 2016, Bugulma / PJSC Tatneft. – Naberezhnye Chelny: Oil And Gas Exposition, 2016. – pp. 145-149. (in Russian)

5. Mingazov M.N., Strizhenok A.A., Fatkhullin R.R. [et al.]. The experience of using indicator studies to study the hydrodynamic relationship between the Sakmar and Upper Permian deposits of the Ashalchinsky field of ultra-viscous oils // Georesources. - 2015. – No. 1. – pp. 29. (in Russian)

### **Сведения об авторах**

*Будкевич Роза Леонидовна*, кандидат технических наук, доцент, заведующая лабораторией нефтепромышленной химии центра научно-технических исследований ГБОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет» - «Высшая школа нефти»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Советская, 186а

E-mail: budkevichrl@yandex.ru

*Белова Татьяна Тарасовна*, научный сотрудник лаборатории нефтепромышленная химия центра научно-технических исследований ГБОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет» - «Высшая школа нефти»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Советская, 186а

E-mail: belova.tatiana92@mail.ru

*Аленькин Илья Алексеевич*, младший научный сотрудник лаборатории нефтепромышленная химия центра научно-технических исследований ГБОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет» - «Высшая школа нефти»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Советская, 186а

E-mail: alenkin.cnti@yandex.ru

### **Authors**

*R.L. Budkevich*, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Petroleum Chemistry at the Center for Scientific and Technical Research of the Almeteyevsk State University of Technology – Higher Petroleum School

186a, Sovetskaya Str., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation

E-mail: budkevichrl@yandex.ru

*T.T. Belova*, Researcher at the Laboratory of Petroleum Chemistry of the Center for Scientific and Technical Research of the Almeteyevsk State University of Technology – Higher Petroleum School

186a, Sovetskaya Str., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation

E-mail: belova.tatiana92@mail.ru

*I.A. Alenkin*, Junior researcher at the Laboratory of Petroleum Chemistry of the Center for Scientific and Technical Research of the Almeteyevsk State University of Technology – Higher Petroleum School

186a, Sovetskaya Str., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation

E-mail: alenkin.cnti@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 15.07.2024*

*Принята к публикации 14.09.2024*

*Опубликована 30.09.2024*