

Тестирование систем трассерного мониторинга горизонтальных скважин на мультифазном метрологическом стенде

Д.Ю. Каюков^{1,2}

1 – ООО «ПНП-Сервис», г. Самара, Россия

2 – ООО «НПО Спектр», г. Самара, Россия

E-mail: dk@nprospectr.com

Аннотация. В 2021–2022 гг. впервые в России и мировой практике были выполнены работы по стендовому тестированию технологий трассирования потоков жидкости в горизонтальных скважинах методом имитации порта гидравлического разрыва пласта для оценки метрологической точности технологии.

Ключевые слова: трассерные исследования, определение характера притока, трассерный мониторинг, маркерная диагностика, профиль притока горизонтальной скважины.

Для цитирования: Каюков Д.Ю. Тестирование систем трассерного мониторинга горизонтальных скважин на мультифазном метрологическом стенде // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 2(41). С. 173–183. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-41.art11>

Многостадийный гидравлический разрыв пласта (МГРП) в нефтяных скважинах на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами широко применяется в настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом. Это одна из немногих технологий, позволяющая с экономической выгодой разрабатывать месторождения с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ).

Диагностика производительности горизонтальных стволов и оценка геометрии трещин призабойной зоны скважин имеют важное значение для повышения эффективности использования технологии МГРП.

Несколько российских и зарубежных компаний предоставляют услуги по трассерным исследованиям горизонтальных скважин, называемым также трассерным мониторингом, маркерной диагностикой или мониторингом профиля притока трассирующими индикаторами.

Трассерный метод является прямым методом регистрации количества трассирующего вещества, поступающего из скважины, которое было предварительно размещено в пласте или на стенке скважины в процессе ее строительства, и результаты измерений не зависят от режима течения жидкости и геометрии скважин, которые оказывают существенное влияние на механические скважинные расходомеры различных конструкций (рис. 1).

В настоящее время существует несколько технических решений, позволяющих поместить трассирующее вещество в скважине или призабойной зоне скважины (ПЗС) таким образом, чтобы поток жидкости из скважины выносил его продолжительное время. Таким образом, можно отметить трассерами потоки разных участков горизонтального ствола и получить представление об их интенсивности и составе.

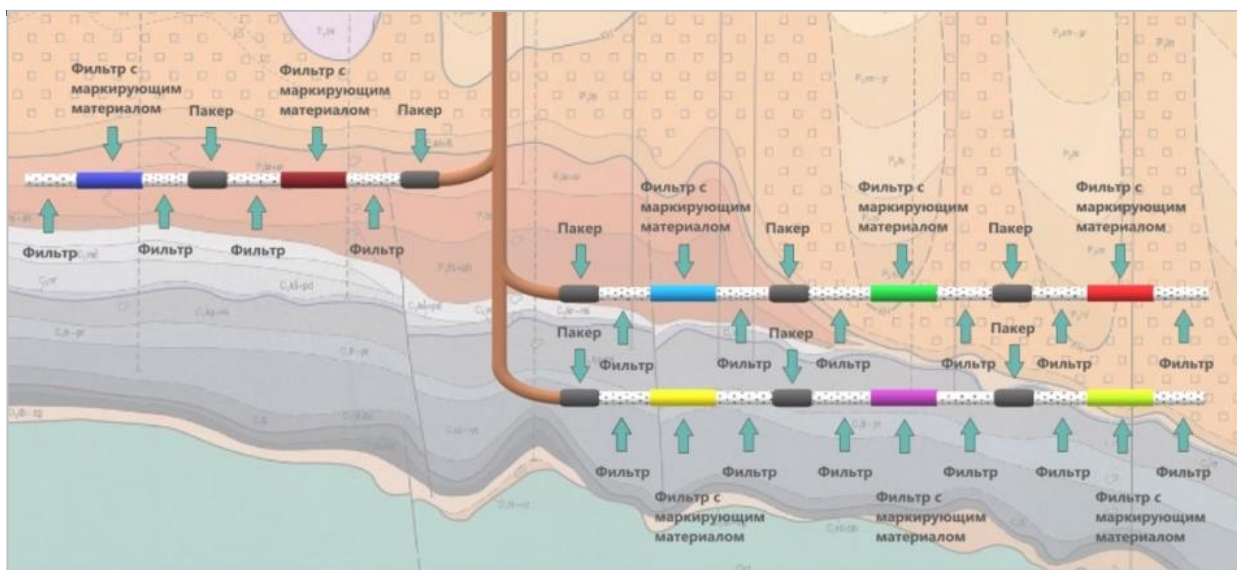


Рис. 1. Пример размещения источника трассера в многоствольной скважине

Существует три основных способа доставки трассеров в призабойную зону скважины скважины:

- Подача трассера в гель при выполнении операций гидравлического разрыва пласта (ГРП);
- Нанесение трассера на пропант;

- Установка в компоновке хвостовика контейнера с трассирующим составом.

Также существует несколько методов интерпретации полученных данных о количестве вынесенного трассера в количественные значения дебитов участков горизонтальных скважин (рис. 2).

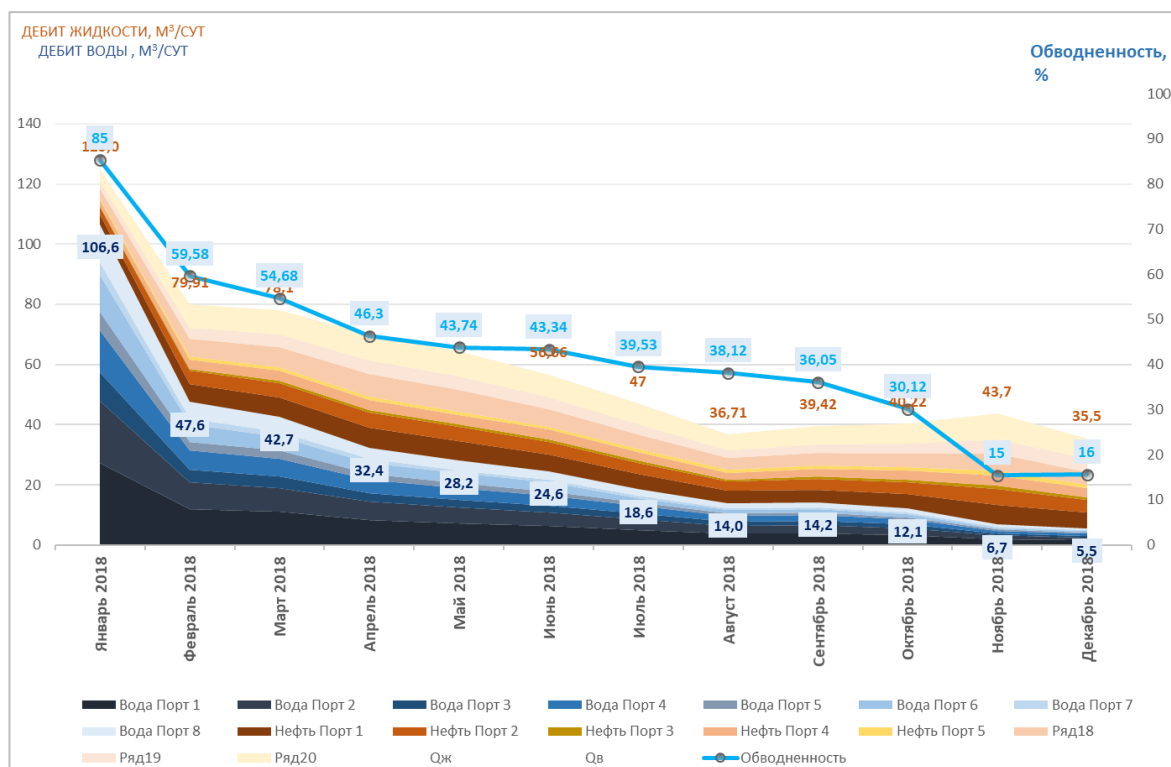


Рис. 2. Графики дебита нефти и воды по каждому порту и суммарно для скважины с МГРП

Трассирующий материал и технология его идентификации

В лаборатории ООО «НПО Спектр» дочернего общества ООО «ПНП-Сервис» были созданы растворимые композитные основы (матрицы) с различной скоростью растворения. Растворимая основа позволяет решать задачи создания источника трассера в скважине со сроком жизни более 5 лет. В качестве трассера используются

микрогранулы пластика (размером 1–5 мкм), окрашенные флуоресцентными цветами различных оттенков. Данные микрогранулы смешиваются с растворимой основой. Помещенные в растворимые матрицы микрогранулы трассера поступают в омывающий трассирующий материал поток жидкости пропорционально скорости растворения удерживающей их матрицы (рис. 3).

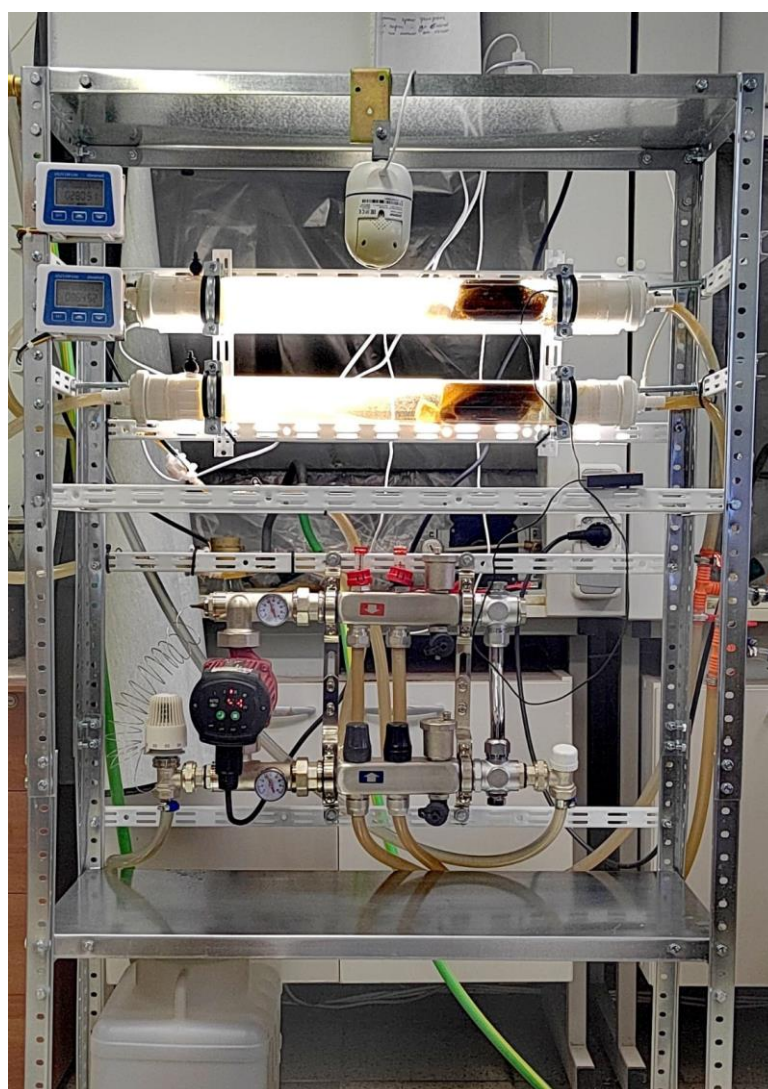


Рис. 3. Фильтрационная установка для подбора скорости растворения основы трассирующего материала (фото автора)

Если отобрать пробу жидкости, которая имела контакт с трассирующим материалом, то по содержанию трассера и его цвету (оттенку или сигнатуре) можно определить, с каким материалом был контакт и какой интенсивности поток омывал данный материал.

Анализ образцов жидкости производится с помощью микроскопа с ультрафиолетовой подсветкой

с программным обеспечением JMicrovision. В программе настраиваются параметры «свечения» частиц трассера каждого оттенка (сигнатуры), происходит автоматическое выделение частиц трассера на изображении с микроскопа и их «распознавание», т. е. отнесение к той или иной сигнатуре. Подсчитывается число частиц каждой сигнатуры (рис. 4).

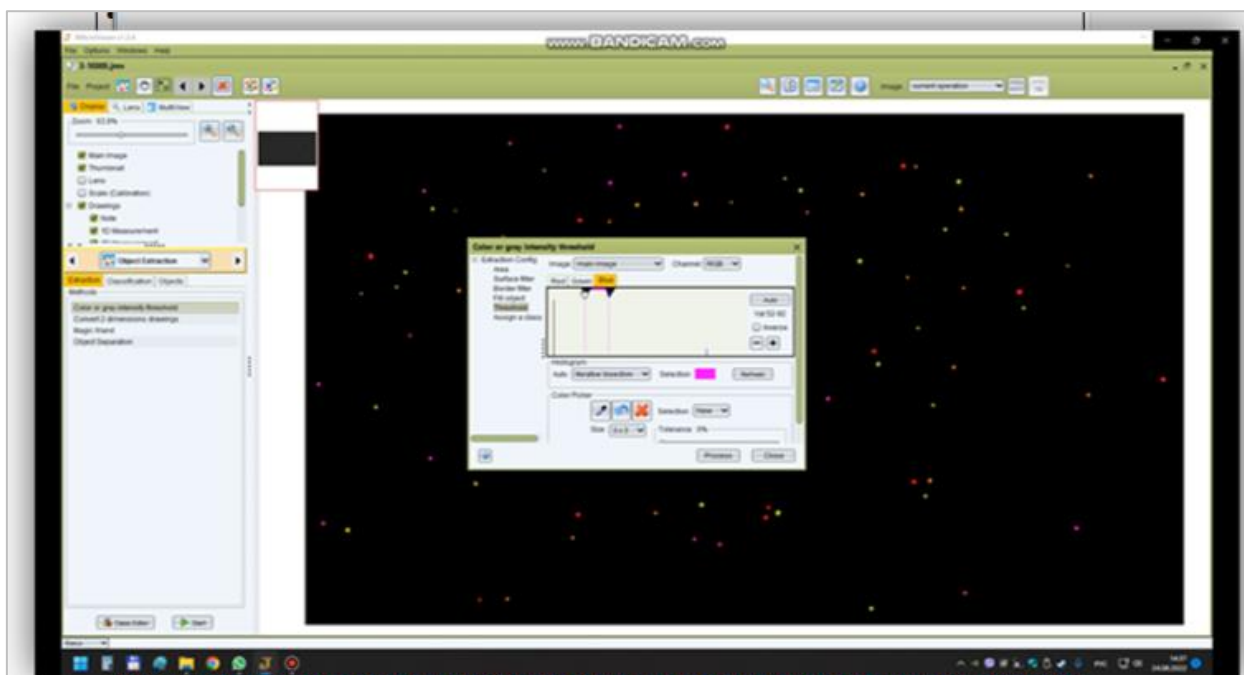


Рис. 4. Идентификация трассера программным методом

В результате научно-исследовательской работы для целей промышленного применения были подготовлены маркерные системы на основе флуоресцентных микроскопических частиц трассера. Трассерные системы, как правило, изготавливаются с учетом особенностей физико-химической среды, в которой предстоит их использовать, и могут различаться по своим техническим характеристикам, но всегда имеют свойство отдавать в поток омывающего флюида микрочастицы

трассера под действием воды, углеводородсодержащей жидкости (например, трансформаторного масла) или газа (рис. 5).



Рис. 5. Образец трассера и композитной трубки для измерения скоростей омывающего потока (фото автора)

Тестирование на метрологическом стенде

По предложению компании ООО «Газпромнефть НТЦ» с 03.10.2022 по 17.10.2022 на стенде «УМФИ» ООО «НГИТ» в г. Щелково выполнено тестирование трассеров компании ООО «ПНП-Сервис» для систем мониторинга интервалов дренирования в скважинах с многостадийным ГРП.



Рис. 6. Мультифазный испытательный стенд (фото автора)



Рис. 7. Установка трассерной системы (нефть + вода + газ) в исследовательские вставки стенда (фото автора)

Представителем ООО «ПНП-Сервис» для проведения испытаний были подготовлены 8 исследовательских вставок, снаряженных кассетами с трассерными системами (трассер + композитный

Мультифазный стенд «УМФИ» представляет собой гидравлическую систему, позволяющую подавать различные сочетания фаз (масло + вода + газ) независимо на две линии мониторинга. Данные о расходе, обводненности, температуре флюида фиксируются автоматически и непрерывно в системе Автоматизированного рабочего места (АРМ) стенда независимо по каждой отдельной линии (рис. 6).

контейнер). Вставки содержали матрицы с индикаторами на воду, углеводороды и газ. В ходе испытаний на выходе стенда отбирались пробы флюида для дальнейшего анализа в лаборатории ООО «ПНП-Сервис» (рис. 7).

I этап испытаний (тестирование водо- и углеводородореагирующих трассеров)

Первый этап испытаний состоял из 5 циклов, в течение которых в испытательные линии подавались смеси из воды и трансформаторного масла различных сочетаний с двукратным отбором проб на выходе стенда (через 4 часа и через 2 часа непрерывной промывки смесью воды и масла). Данные об общем расходе смеси через стенд и общей обводненности смеси приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные смесей 1-го этапа

№ п/п	Параметр	I этап испытаний				
		1	2	3	4	5
1	Номер миницикла	1	2	3	4	5
2	Дата	03.10.2022	04.10.2022	05.10.2022	06.10.2022	07.10.2022
3	Средняя обводненность смеси, %	66,75	79,39	79,55	29,81	29,76
4	Средний объемный расход смеси, м ³ /ч	0,1507	0,2020	0,2013	0,2019	0,2007

Во время первого этапа испытаний было отобрано 10 проб.

Анализ проб микроскопическим методом показал присутствие трассера в количестве, достаточном для качественного и количественного расчета соотношения (вода/масло) жидкостей, прошедших через каждую линию стенда.

В результате интерпретации проведенных лабораторных исследований получены данные об использованных в каждом миницикле вставках и распределении состава притока по каждой вставке.

Результаты интерпретации 1-го этапа испытаний (цикл 3), см. рис. 8.

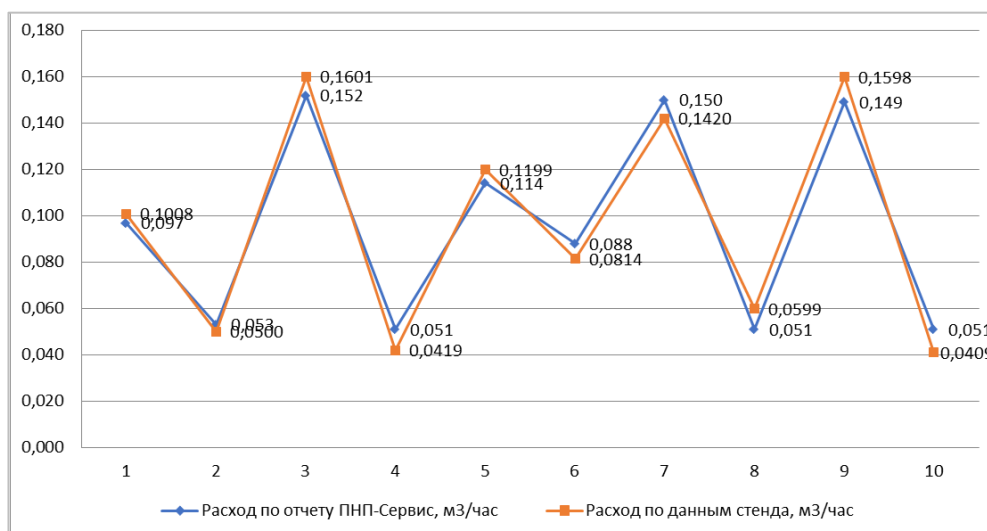


Рис. 8. Сравнение данных трассерного исследования и показаний стенда по расходу жидкости (I этап испытаний)

Полученные данные по количеству жидкости, прокачанной через трассирующие вставки, были сопоставлены с показаниями метрологических приборов стенда, был выполнен анализ погрешности (рис. 9). Аналогичным образом были выполнены работы по расчету

обводненности (цикл 3) и сопоставлению результатов трассерного измерения и показаний метрологических приборов (рис. 10).

Была рассчитана погрешность измерений в сравнении с «приборным» методом измерения (рис. 11).

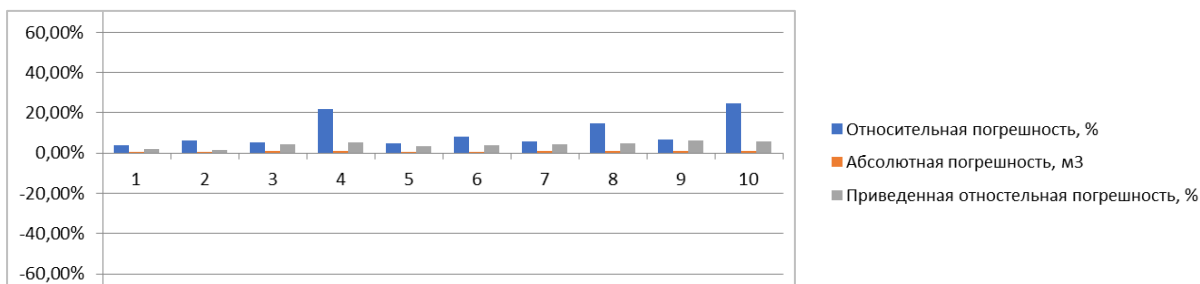


Рис. 9. Анализ погрешности данных трассерного исследования и показаний стенда по расходу жидкости (I этап испытаний)

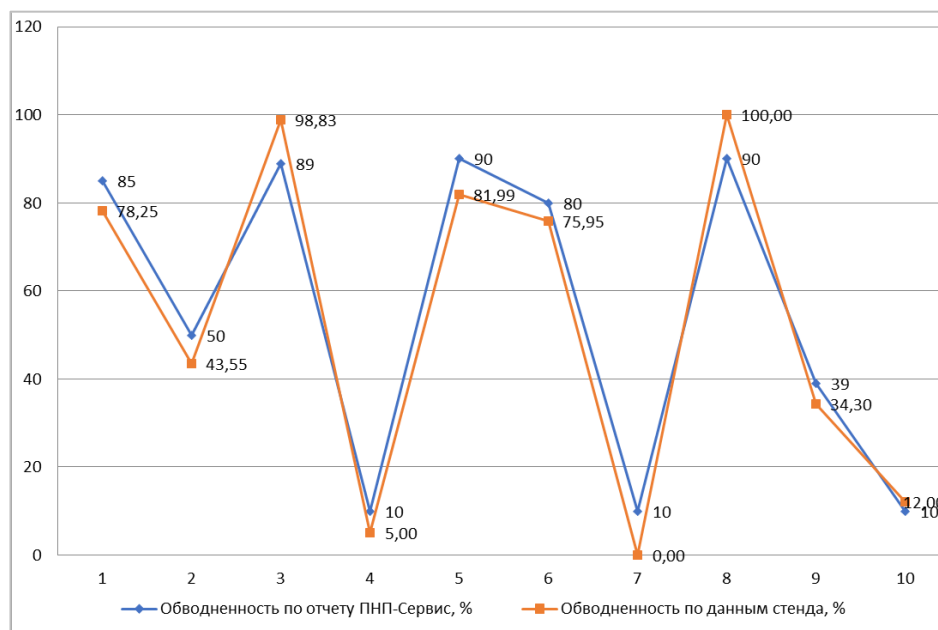


Рис. 10. Сравнение данных трассерного исследования и показаний стенда по обводненности (I этап испытаний)

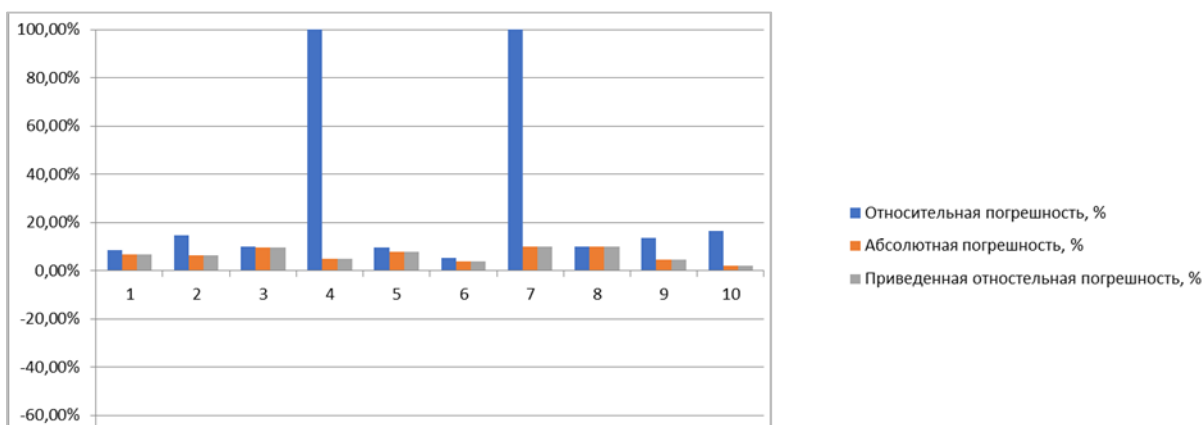


Рис. 11. Анализ погрешности данных трассерного исследования и показаний стенда по обводненности (I этап испытаний)

Высокая, 100%-ная, погрешность образовалась в результате того, что при определении обводненности в миницикле № 4 (цикл 3) была допущена относительно небольшая ошибка в распределении воды между вставками. Вместо 0% была показана обводненность в 10%, что привело к констатации факта о 100%-ной относительной погрешности. Также в миницикле № 2 (цикл 3) вместо обводненности в 5% была определена обводненность в 10%, что тоже по математическому правилу определения относительной погрешности привело к констатации факта о 100%-ной погрешности.

Особенность исчисления относительной погрешности при истинных значениях, близких к 0, такова, что дает погрешности в десятки процентов даже при незначительных абсолютных отклонениях, а при нулевом истинном значении любая погрешность оценивается в 100%. Например, в данном случае в миницикле № 4: если во вставку подать хотя бы один миллилитр масла, то относительная погрешность изменится со 100% на 9,9999%, т. е. уменьшится фактически в 10 раз. Более того, при нулевом значении обводненности любое, даже самое небольшое, отклонение от 0 приводит к 100% относительной погрешности.

Таким образом, для объективной оценки погрешности измерений была принята приведенная относительная погрешность.

Приведенная погрешность нормируется к диапазону шкалы (абсолютная погрешность/максимальный диапазон значений) и показывает объективную величину отклонения. Именно на основании приведенной погрешности устанавливается класс точности приборов и поэтому по приведенной погрешности была дана оценка точности технологии.

II этап испытаний (тестирование газореагирующих трассеров)

Второй этап испытаний состоял также из 5 минициклов, в течение которых на протяжении 4 часов в испытательные линии подавалась вода. Затем дополнительно в течение 2 часов в одну из испытательных линий подавался воздух (расход воздуха изменялся в процессе эксперимента). Данные об общем расходе смеси и воздуха для подачи через стенд и общей обводненности смеси приведены в табл. 2.

Во время второго этапа испытаний было отобрано 10 проб.

Таблица 2

Исходные данные смесей 2-го этапа

№ п/п	Параметр	II этап испытаний				
		1	2	3	4	5
1	Номер миницикла					
2	Дата	11.10.2022	12.10.2022	13.10.2022	14.10.2022	17.10.2022
3	Средняя обводненность смеси, %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	Средний объемный расход смеси, м ³ /ч (4 часа)	0,1904	0,1913	0,1755	0,2005	0,1900

Анализ проб микроскопическим методом показал присутствие трассера в количестве, достаточном для качественного и коли-

чественного расчета соотношения (вода/газ), в жидкостях, прошедших через каждую линию стенда (рис. 12, 13; табл. 3; рис. 14).

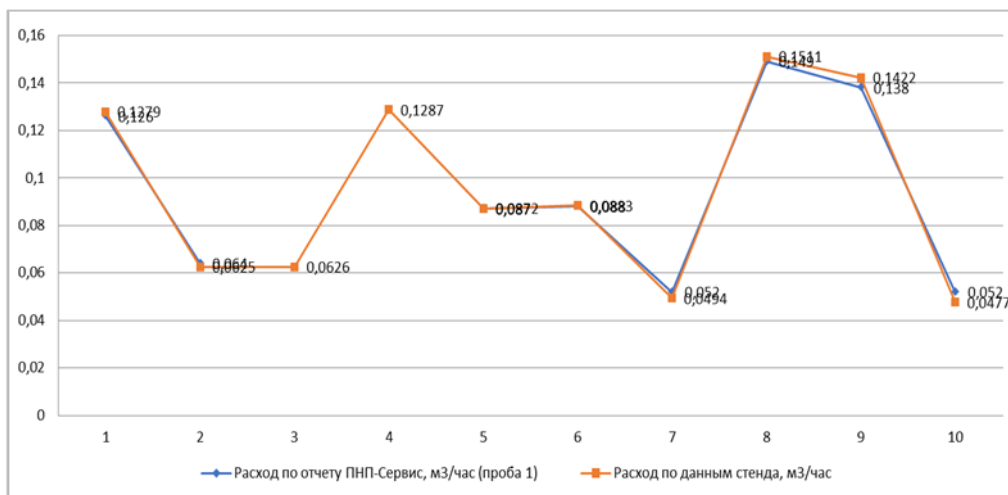


Рис. 12. Сравнение данных расхода жидкости трассерного исследования и показаний стенда по расходу жидкости (II этап испытаний)

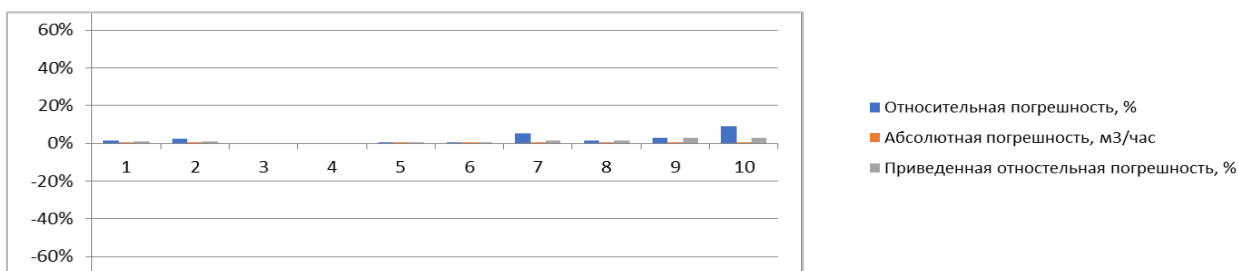


Рис. 13. Анализ погрешности данных расхода жидкости трассерного исследования и показаний стенда (II этап испытаний)

Таблица 3

Сравнение данных расхода газа трассерного исследования и показаний стенда

Миницикл	Номер по порядку	Номер вставки в испытательной линии с газом	Количество газового трассера, ед.	Объем газа в стендовой установке (СУ) по данным стенда, м³/час
1	1	3	6	2,28
	2		0	0
2	3	3	1	2,0186
	4		0	0
3	5	2	18	4,963
	6		0	0
4	7	7	33	11,9958
	8		0	0
5	9	1	600	25,1103
	10		0	0

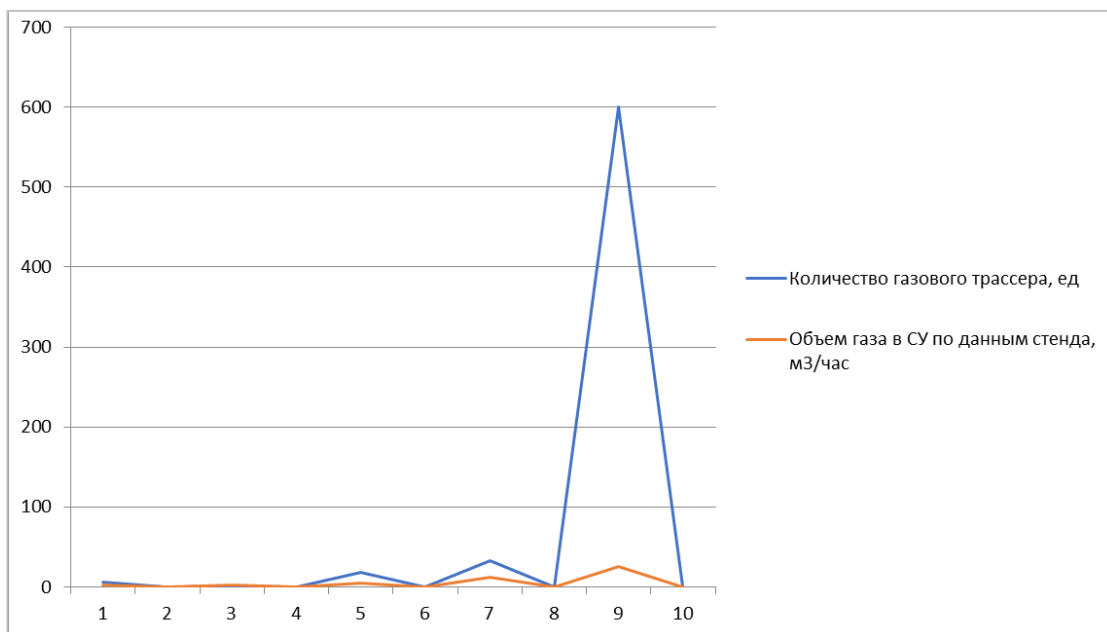


Рис. 14. Сравнение данных расхода газа трассерного исследования и показаний станда (II этап испытаний)

Отдельно необходимо отметить, что в миницикле № 2 использовались вставки № 3 и № 5, но достоверно определить количественное распределение состава притока в этом миницикле не представляется возможным, так как загрязнение проб сторонними маркерами создало значительные помехи при анализе и распознавании маркеров.

Результаты

1. В 2021–2022 гг. впервые в России и мировой практике были выполнены работы по стендовому тестированию технологий

трассирования потоков жидкости в горизонтальных скважинах методом имитации порта ГРП для оценки метрологической достоверности;

2. Результаты тестирования технологии компании «ПНП-Сервис» показали, что измерение соотношения скоростей потоков и определение компонентного состава жидкостей трассерным методом может быть выполнено в скважинных условиях с точностью, соизмеримой с получаемой в поверхностных условиях с помощью расходомеров и массомеров.

Testing of tracer monitoring systems of horizontal wells on a multiphase metrological test bench

D.Yu. Kayukov^{1,2}

1 – PNP-Servis LLC, Samara, Russia

2 – Spektr Scientific Production Association LLC, Samara, Russia

E-mail: dk@npospectr.com

Abstract. In 2021–2022, for the first time in Russia and world practice, work was carried out on bench testing of technologies for tracing fluid flows in horizontal wells by simulating a hydraulic fracturing port to assess the metrological accuracy of the technology.

Keywords: tracer studies, determination of the nature of the inflow, tracer monitoring, marker diagnostics, horizontal well inflow profile.

Citation: *Kayukov D.Yu.* Testing of tracer monitoring systems of horizontal wells on a multiphase metrological test bench // Actual Problems of Oil and Gas. 2023. Iss. 2(41). P. 173–183. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-41.art11> (In Russ.).