

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.74-88>

EDN GEJHFY

УДК 622.276.5.001.5

## **Исследование горизонтальных скважин с трещинами гидравлического разрыва пласта методами неустановившейся фильтрации**

<sup>1</sup>Гильфанов Э.Ф., <sup>2</sup>Апасов Т.К.

<sup>1</sup>Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Тюменский Индустриальный университет, Тюмень, Россия

## **Pressure transient testing of hydraulically fractured horizontal wells**

<sup>1</sup>E.F. Gilfanov, <sup>2</sup>T.K. Apasov

<sup>1</sup>LUKOIL-Engineering Limited KogalymNIPIneft Branch Office, Tyumen, Russia

<sup>2</sup>Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

**E-mail: Eduard.Gilfanov@lukoil.com**

**Аннотация.** Одним из наиболее действенных методов увеличения добычи из скважин, является обработка гидроразрывом пласта (ГРП). При разработке низкопроницаемых коллекторов стало повсеместным проведение ГРП. Важным для успешного проведения ГРП является точный расчет фильтрационных параметров объекта разработки, для чего проводят калибровочные испытания пласта. По многим причинам проведение гидродинамических исследований скважин (ГДИС) перед ГРП чаще всего не проводится, и информация по начальным фильтрационным свойствам пласта после длительной работы скважины становится неверной. Недостающие данные по фильтрационным свойствам пласта коэффициенту проницаемости возможно узнать по данным теста пласта проводимых при ГРП. Значительный массив данных при испытаниях пласта при ГРП при этом мало используется.

Для получения информации о пластовом давлении и фильтрационно-емкостных свойствах используется метод исследования кривой падения давления (КПД). Перед проведением ГРП создается модель обработки. Для минимизации различий модели обработки и реальных свойств пласта перед проведением основного ГРП проводится ми-

ни ГРП, где получают информацию о давлении смыкания и других технологических параметрах также получают информацию фильтрационных свойствах, проницаемости пласта. Данные параметры получают программно при анализе кривой падения давления (G-функции). В данной работе предлагается использование интерпретации G-функции как дополнительной информации при интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин (ГДИС), кривой восстановления давления (КВД) и КПД.

**Ключевые слова:** гидравлический разрыв пласта, горизонтальная скважина, гидродинамические методы исследования скважин, кривая падения, восстановления давления (КПД, КВД), G- функция

**Для цитирования:** Гильфанов Э.Ф., Апасов Т.К. Исследование горизонтальных скважин с трещинами гидравлического разрыва пласта методами неустановившейся фильтрации // Нефтяная провинция.-2024.-№1(37).-С. 74-88. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.74-88>. - EDN GEJHFY

**Abstract.** One of the most important factors affecting the oil and gas industry as the main means of increasing production from wells is hydraulic fracturing (FRACKING). It is important for successful hydraulic fracturing to conduct calibration tests of the formation and accurate calculation of filtration parameters of the development object. During the development of low-permeable reservoirs, hydraulic fracturing has become widespread. For some reasons, hydrodynamic studies of wells (GDIS) are not carried out during development and the information on the filtration properties of the formation becomes distorted after long-term operation of the well. The missing data on the filtration properties of the formation, the permeability coefficient, can be found out from the data of the formation test conducted during hydraulic fracturing. At the same time, a significant amount of data remains unclaimed during hydraulic fracturing tests

For the analysis of calibration tests, the pressure drop curve (efficiency) and the complementary analysis tool G-function are investigated. In this paper, it is proposed to use the interpretation of the G-function as additional information when interpreting the results of hydro-dynamic well studies (GDIS), the pressure recovery curve (KVD) and efficiency.

**Key words:** fractured horizontal wells, hydrodynamic methods of well testing, drop curve, pressure build-up (efficiency, pressure build-up), G-function

**For citation:** E.F. Gilfanov, T.K. Apasov Issledovaniye gorizontal'nykh skvazhin s treshchinami gidravlicheskogo razryva plasta metodami neustanovivsheysya fil'tratsii [Pressure transient testing of hydraulically fractured horizontal wells]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(37), 2024. pp. 74-88. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.74-88>. EDN GEJHFY (in Russian)

## Введение

С 90 х годов прошлого столетия началось интенсивное освоение и эксплуатация низкопроницаемых коллекторов нефти и газа горизонтальными скважинами (ГС) [18]. Достаточно быстро в низкопроницаемых коллекторах метод бурения ГС показал недостаточность простого увеличения контакта с коллектором. В дальнейшем, как наиболее действенный метод улучшения рентабельности разработки ГС логическим продолжением стал метод многостадийного гидравлического разрыва пласта (МГРП).

При производстве ГРП проводятся испытания пласта с целью определения геомеханических характеристик пласта. После пробных испытаний пласта при мини-ГРП производится замер КПД. Эта информация как правило мало используется несмотря на высокое качество записи измерения. Так как в низкопроницаемых коллекторах основным ГТМ в период освоения является ГРП, то сама первичная информация по характеристике пласта очень ценна. Количество опубликованных работ по сравнительному анализу КПД при мини ГРП и КВД недостаточно.

В основном разработаны модели ГС с вертикальными трещинами для терригенных пород. Из-за сложности учёта физической модели трещиноватых коллекторов, исследований фильтрации в трещиноватых коллекторах рассмотрено недостаточно.

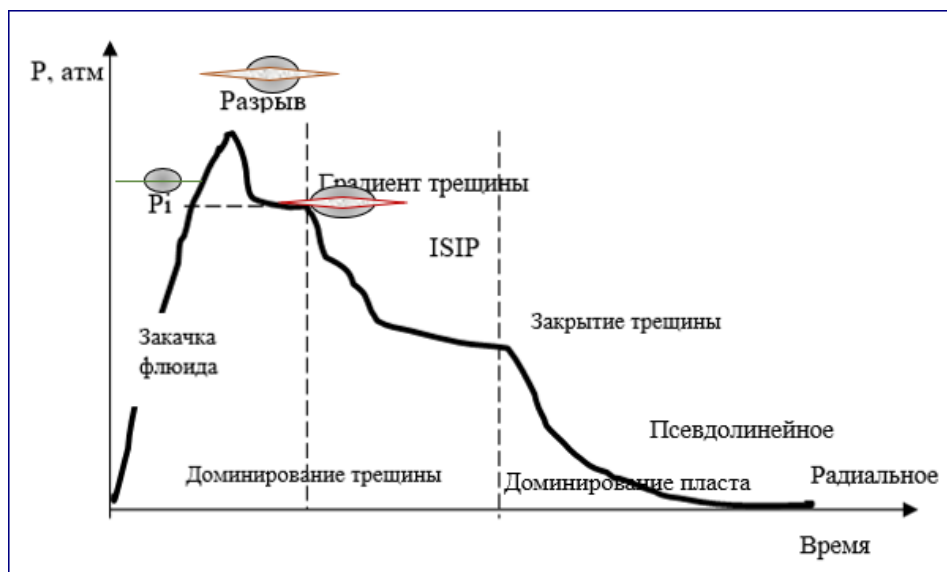
В работе [2,4,5,11] рассматриваются оценка свойств пласта по исследованиям тестов после мини ГРП. Модели притока к горизонтальной скважине с несколькими трещинами, многостадийным ГРП (МГРП) рассматриваются в работах [9,10]. Модели разработаны для пласта, с коллекторскими свойствами которые принято относить к низкопроницаемым и ультранизкопроницаемым коллекторам. В данных приведенных работах отсутствует проверка моделей на реальных примерах.

Целью данной работы является применение и оценки огромного объема информации получаемой замером КПД после мини ГРП и примени-

мость результатов и прогнозировании свойств пласта. При исследованиях КВД часто повторяется ситуация, такая как невозможность прямых замеров и или отсутствие возможности провести информативные исследования в данное время на данном объекте исследования и поэтому получаемые данные при мини ГРП необходимо учитывать в дальнейших исследованиях эксплуатируемого объекта.

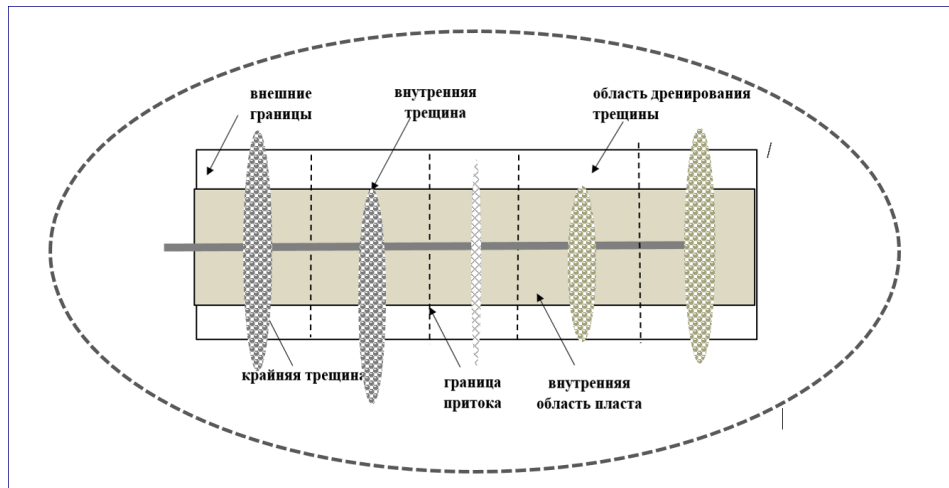
### Объект и методы исследования

Процесс ГРП проводится в несколько этапов исследований пласта: давлений нагнетания, разрыва, и последующей остановки, исследования кривой графика падения давления (КПД) перед основным ГРП [4,5,6,7]. Результатом исследования КПД является давление разрыва, мгновенное давление открытия – закрытия трещины и пластовое давление, ISIP (Рис. 1).



*Рис. 1. Схема проведения ГРП*

В целях упрощения аналитического решения форма дренирования принимается прямоугольной (Рис. 2) [15,17,18,19], но в реальности модель выглядит сложнее.



**Рис. 2. Модель фильтрации к ГС с многостадийным ГРП**

Модель включает три области: внешний резервуар (однородный), внутренний резервуар (двойная пористость) и трещины гидроразрыва.

Чен (Chen С) и Рагхаван (Raghavan R.) (1997) [11] исследовали продуктивность горизонтальной скважины с трещинами в замкнутом прямоугольном коллекторе. Вышеприведёнными авторами рассмотрены различные режимы потока, которые могут проявляться множественными трещинами, пересекающими горизонтальную скважину.

Чен и Рагхаван предложили 4 четыре возможных режима потока в системе с двумя трещинами (параллельные и продольные трещины). Чен и Рагхаван пришли к выводу, что длина трещин должна зависеть от расстояния между трещинами и коэффициента проницаемости коллектора (длинные трещины для низкопроницаемых коллекторов и короткие, широкие трещины для высокопроницаемых коллекторов). В процессе последовательного гидроразрыва пласта происходит также и наложение первичных трещин на трещины следующих стадий ГРП. Форма и направление трещин относительно оси скважины значительно отличаются от представленных на рис. 1 и зависит во многом от направления регионального стресса. Возможны пересечение трещин на стадиях ГРП. Модели пересечений трещин и аналитические способы расчеты расстояния между трещинами приведены в [18]. Угол между трещиной относительно оси скважины на практике

не имеет прямого угла и зависит от структуры пород, литотипа и анизотропии пород, вскрытых ГС. Когда давление закачиваемой жидкости поднимается выше минимального главного напряжения, могут активироваться другие группы трещин. То, какие трещины открываются, зависит от ориентации относительно направления минимального и максимального напряжения и приложенного давления жидкости.

Наиболее точные данные, полученные глубинными манометрами. При технической невозможности измерение давления производят на устье. При втором способе замеры менее точны из-за влияния ствола скважины и погрешностей учета влияния ствола скважины.

В процессе ГРП проводится несколько испытаний пласта [2,3,4,5,14]. При мини ГРП проводится обработка пласта без проппанта. До основного ГРП проводится предварительная калибровка закачки проппанта в пласт, при котором определяются такие параметры как давление закрытия трещины и коэффициенты утечек из трещины в пласт, мини -ГРП. После исследования график КПД.

Обработка КПД и расчет пластового давления проводится по методу Хорнера [13,15]. Полулогарифмический график зависимости давления от логарифма отношения суммы времени остановки скважины и времени работы до остановки к времени исследования. Пластовое давление, полученное методом Хорнера, может быть завышенным при недостаточном времени работы скважины до остановки. От точности определения пластового давления зависит во многом успешность проведения ГРП.

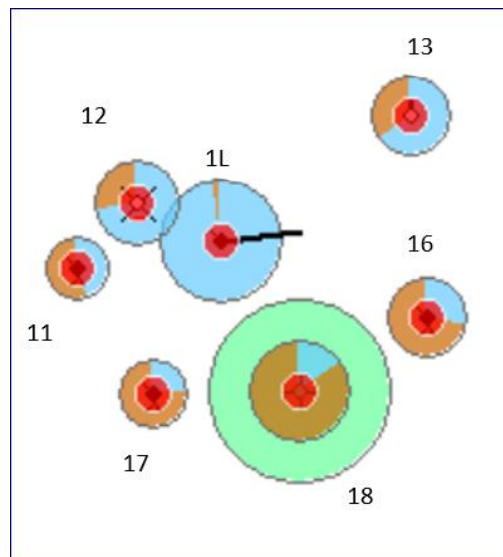
В 1987 году Кен Нольте (Nolte K.G.) [2,3,5,11,21] ввёл для анализа калибровочных тестов исследование кривой падения давления (КПД) и предложил как дополнительный инструмент анализа G-функцию (время Нольте). G - функция — это функция, используемая для определения времени закрытия трещины. G – график является функцией безразмерного времени, связывающее время остановки, предполагая при этом, что расход

при закачке постояннен [7,8,11,20,21]. В идеальном случае зависимость G-функции давления от времени представляет прямую линию. Отклонения от прямой линии будут характеризовать особенности процесса ГРП. Закрытие трещины или продолжение процесса роста трещины.

Интерпретация исследований КВД после мини ГРП и КВД проведена в программе Карра Work Station 5.40.

### Результаты

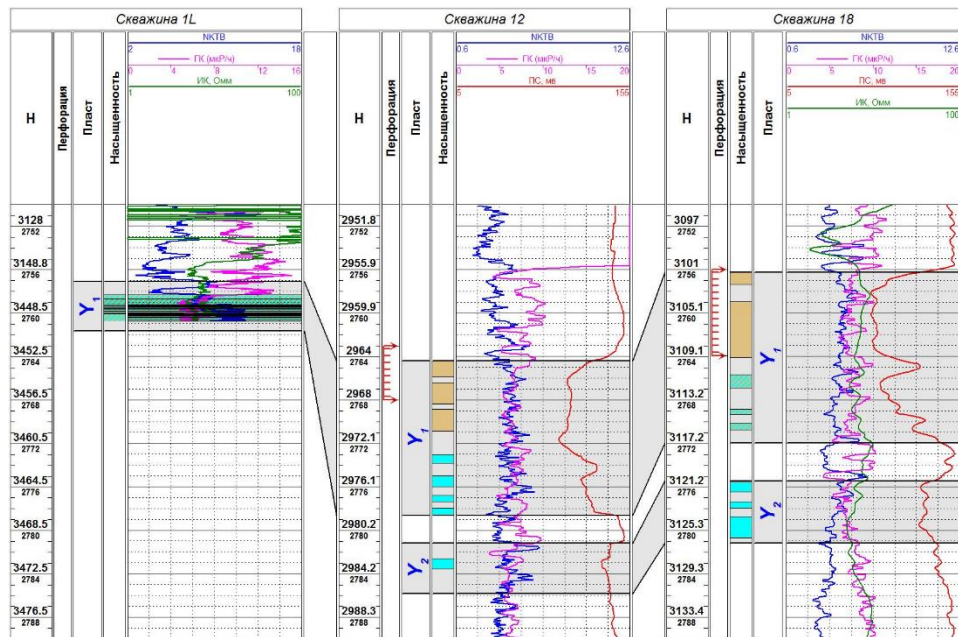
Рассматривается пример интерпретации КВД при ГРП и КВД при освоении на скважине 1L на месторождении Севера Западной Сибири. На рис. 3 приведена карта суммарных отборов участка скважины 1L.



*Рис. 3. Карта суммарных отборов скважин участка скв. 1L*

Разрабатываемый пласт Y1 скважиной вскрыт полностью, 100%. (Рис. 4).

Нефтенасыщенная часть горизонтального участка скважины составляет 219 м. Песчанистость составляет 0.86. Ниже по геологическому разрезу залегает водонасыщенный коллектор, пласт Y2. Толщина глинистой перемычки между пластом Y1 и Y2 в среднем по геологическому разрезу составляет 10 м. Достаточная для снижения риска прорыва в нижележащий водоносный пласт Y2



**Рис. 4. Корреляция геологического разреза по данным ГИС скв. (1L -12 - 18)**

Пласт Y1 представлен плотными, песчаниками и алевролитами серыми, мелкозернистыми, глинистыми, слюдистыми, с растительными остатками. Аргиллиты темно-серые, крепкие. Местами встречаются прослой песчаника желтоватого оттенка.

Пласт Y1 характеризуется низкими значениями гидродинамических параметров. Коэффициент продуктивности изменяется в диапазоне от 0,01 до 0,2 м<sup>3</sup>/(сут·МПа), гидропроводность – от 0,2 до 1,6 мкм<sup>2</sup>·см/(мПа·сек), проницаемость – от 3,2·10<sup>-3</sup> мкм<sup>2</sup> до 19,0·10<sup>-3</sup> мкм<sup>2</sup>. Начальное пластовое давление 265 атм.

Для увеличения притока жидкости в скважине проведено многостадийное ГРП с 3-мя портами. В пласт закачано всего 80 т пропанта. В 1-й и 2-й порт по 30 т пропанта и 20 т в 3-й. Рабочая жидкость при заполнении трещины гелем на водной основе с плотностью 1,01 г/см<sup>3</sup>. В результате ГРП по данным сервисной компании, превышение фактической полудлины трещины от проектной составило 17, 10, 29 м. При плане 80, 90, 67 м соответственно. Высота трещин 36, 34, 29 м соответственно. Режим работы скважины 1L после ГРП составил: дебит нефти – 13 т/сут, дебит жидко-



сти – 66 т/сут, что оказалось ниже запланированного дебита. Обводнённость по плану, 60%, по факту 80%.

По всем портам созданная (гидравлическая) полудлина трещины больше проектной: и это обстоятельство по мнению специалистов разработчиков могло обусловить охват трещинами ГРП зон влияния нагнетательных скважин (рис.5).

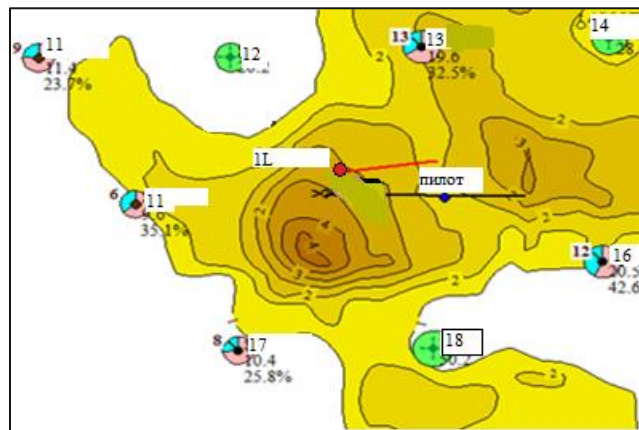


Рис. 5. Карта начальных нефтенасыщенных толщин пласта Y1

Но возможен и прорыв трещиной изолирующей перемычки, пласта аргиллитов, между пластами Y1 и Y2 (Рис. 6), что и показал анализ теста ГРП.

На первой стадии ГРП на графике КПД заметно резкое падение давления (показано чёрной стрелкой, график давления красный цвет) (Рис. 6).

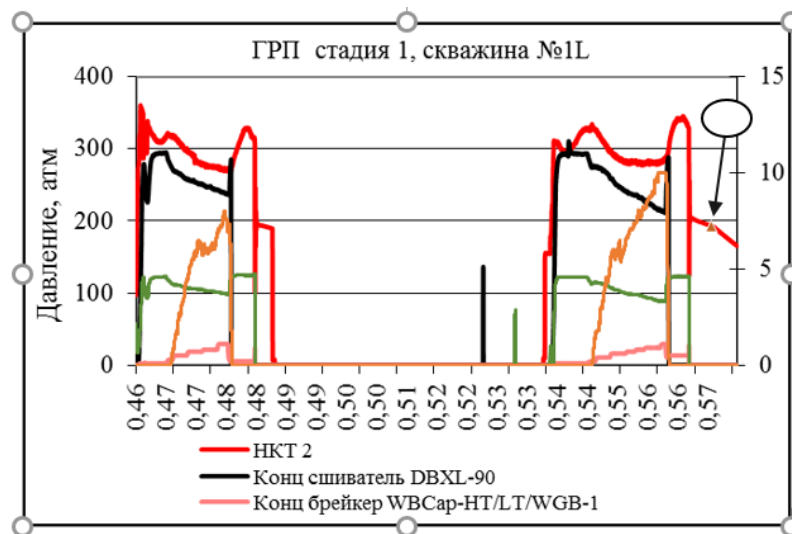


Рис. 6. График закачки и КПД. Стадия 1

По результатам интерпретации графика G-функции КПД в ПО Каппа Сапфир полудлина трещины,  $X_f$  равная 119 м (Табл. 1, Рис. 7). На графике зависимости производной давления от G-функции замечен рост производной ( $GdP/dG$ ) (чёрного цвета) после остановки закачки, из чего следует, что закрытия трещины не произошло.

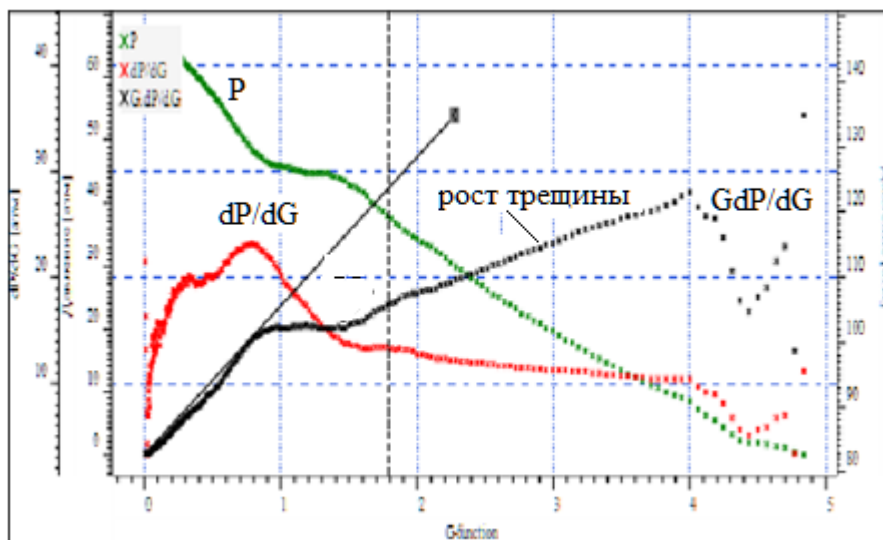


Рис. 7. График G-функции мини-ГРП скв. 1L

Таблица 1

*Данные интерпретации ГРП первый порт*

Параметр	Ед.изм.	Значение
Пластовое давление	атм	265.48
Проницаемость	$\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$	4,16
Полудлина трещины	м	119

Через 12 дней после ГРП проведено освоение пласта. Освоение пласта проведено методом компрессирования. После компрессирования проведено исследование КВД. Запись КВД проведена на глубине максимально приближенной к кровле пласта, то есть исключена возможность погрешности из-за влияния ствола скважины. При анализе диагностического графика КВД (Рис. 8) выявляется, что после непродолжительного времени линейного притока, 20 часов начинается радиальный приток. И так как повышенная обводненность, то вероятен приток с нижнего пласта через тре-

щину, то есть одна из трещин ГРП, в нашем случае на первой стадии, достигла нижнего водоносного пласта У2.

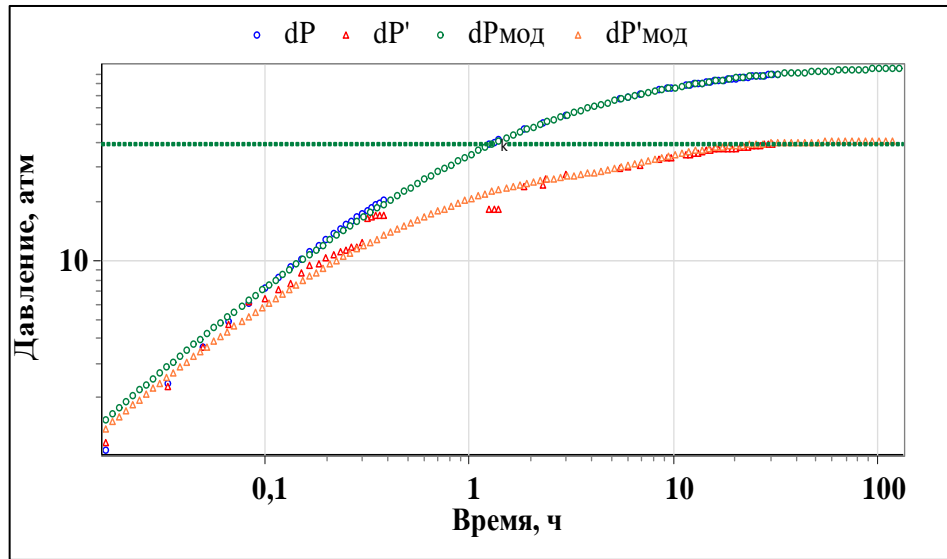


Рис. 8. Диагностический график КВД скв. 1L через 12 дней после ГРП

В результате исследования КВД полудлина трещины расчетная равна 115 м (Табл. 2). По результатам теста КВД после ГРП полудлина трещины равна 119 м, то есть трещина несколько уменьшилась.

Таблица 2

*Данные интерпретации КВД*

Параметр		Ед.изм.	Значение
Пластовое давление		атм	262,28
Проницаемость,		мкм <sup>2</sup> ·10 <sup>-3</sup>	4,22
Проводимость		мкм <sup>2</sup> ·10 <sup>-3</sup> ·м	10,94
Скин-фактор,	Полный	б.р	-5,19
	Геометрический S <sub>g</sub>	б.р	-5,30
	Механический	б.р	0,07
Полудлина трещины,		м	115

**Обсуждение результатов**

Из табл. 2 следует, что пластовое давления снизилось на 3 атм. Измеренное пластовое давление при ГРП выше, что может являться результатом загрязнения буровым раствором и жидкостью глушения.

Проницаемость пласта полученная при КПД ГРП  $4,16 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ , проницаемость по результатам исследования КВД ( $4,22 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ ). Проницаемость улучшилась. Скин фактор загрязнения практически около нуля, то есть фильтрационного сопротивления нет.

Информация, полученная по исследованиям тестов КПД после мини ГРП, помогает оценить предварительно проницаемость пласта и в дальнейшем прогнозировать фильтрационные свойства пласта.

При совместном анализе ГДИС и испытаний пласта при ГРП выявление причин обводненности продукции скважин становится более обоснованным. В результате данного эксперимента получена дополнительная информация по геометрии трещины, увеличение высоты и как следствие прорыв в нижележащий пласт.

### **Выводы**

Программное обеспечение ПО Каппа модуль Сапфир в новой 5-й версии включает обработку тестов мини-ГРП, что расширяет возможности получения дополнительной информации о физических свойствах пласта. Результаты обработки оценочных тестов ГРП следует использовать как дополнительные данные для интерпретации ГДИС. Необходимым аналитическим инструментом является метод Хорнера и при анализе графиков КПД тестов ГРП. В работе [21] используются традиционные методы полулогарифмического анализа и графиков Хорнера для анализа графиков КПД при тестах ГРП.

### **Благодарности**

*Авторы выражают благодарность за содействие в публикации статьи коллективу филиалу КогалымНИПИнефть в г. Тюмени.*

## Список литературы

1. Гильфанов Э.Ф. Сравнение фильтрационно-емкостных свойств пласта по данным тестов исследования кривой падения давления при гидравлическом разрыве пласта и кривой восстановления давления //Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений - 2020 –№9-С.105 – 108.
2. Давлетбаев А.Я., Анализ кривых падения давления после нагнетательных тестов при гидроразрыве пласта /Асалхузина Г.Ф., Ильясов А.М., Махота Н.А., Нуриев А.Х., Назаргалин Э.Р., Пестриков А.В., Сергейчев А.В // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 41 – 45.
3. Давлетбаев А.Я., Планирование и анализ нагнетательных тестов при проведении гидроразрыва в низкопроницаемых пластах с применением «РН-грид»/Махота Н.А., Нуриев А.Х., Уразов Р.Р., Пестриков А.В., Сергейчев А.В. // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 10. – С. 77–83.
4. Уразов Р.Р., О преимуществах применения симулятора гидроразрыва пласта при анализе калибровочных нагнетательных тестов DFIT/мини-ГРП в ГС с МГРП/ Максимов А.А., Мумбер П.С., Пестриков А.В., Сергейчев А.В // Материалы конференции SPE- 21 ноября 2018 Тюмень (Russian)
5. Экономидес М.Д, Унифицированное проектирование гидроразрыва пласта. Установление взаимосвязи между теорией и практикой /Олни Р., Валько П. - М-2002 - 221с
6. Салимов О.В., Салимов В.Г. Особенности развития трещин гидроразрыва пласта на месторождениях Татарстана // Сетевое научное издание «Нефтяная провинция» - 2018 - №1(13) URL: <http://www.vkro-raen.com>.
7. Желтов Ю.П. Гидравлический разрыв пласта. М.: Гостоптехиздат. 1964 - 98 с.
8. Анкушев Я.Е. Анализ мини-ГРП при проведении гидроразрыва пласта,/URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mini-grp-pri-provedenii-gidrorazryva-plasta/>// Достижения науки и образования - Иваново -1(23)-2018
9. Yesiltepe C. Accessed drainage volume and recovery factors of fractured horizontal wells under transient flow. //A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science - Golden, Colorado – 2011 -p. 96
10. Brown M. L. Analytical trilinear pressure transient model for multiply fractured horizontal wells in tight shale reservoirs // A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science – Golden – Colorado -2014 - p. 118
11. Ispas I. N. A coupled model for the prediction of fluid and reservoir properties from mini-frac tests // A Dissertation approved for the School of petroleum and geological engineering Norman, Oklahoma -1999-p. 293
12. Gaol A. M. L Interference test analysis with two fractured horizontal wells// A Dissertation approved for the School of petroleum and geological engineering of the Colorado School of Mines, Colorado – 2014-p. 98
13. Bourdet D. Well test analysis: The use of advanced interpretation models Paris - Amsterdam - Elsevier - 2002 – 439 p.
14. Frick T.P., Brand C.W., Schlager B., Economies M.J. Horizontal Well Testing of Isolated Segments // SPE J. –Vol. 1. – № 3. – 1996. – P. 261–273.
15. Bruce R.Meyer, Lucas W.Bazan /Optimization of Multiple Transverse Hydraulic Fractures In Horizontal Wellbores/Bruce R. Meyer, Lucas W. Bazan, SPE 131732 - 2010
16. Nolte, K.G.: "A General Analysis of Fracturing Pressure Decline with Applications to Three Models," SPEFE 571-583, Dec. 1986, and also Chapter 14 and Appendix J of the SPE Monograph: Recent Advances in Hydraulic Fracturing VoL 12, 1989

17. Fan, Y.: "A new Interpretation for Fracture Calibration Treatments," SPE 37401, 107-115, March 1997
18. Joshi S. D., Joshi Ph. D. Horizontal well technology. Technologies international, Inc. – Tulsa, OK, USA, 1990
19. McClure Mark W., Horne R., Discrete fracture network modeling of hydraulic stimulation –Heidelberg - 2013 - p. 96
20. Samaniego, F.V. and Cinco-Lay H.: "Transient Pressure Analysis for Variable Rate Testing of Gas Wells", SPE 21831,249-258, April 1991
21. Han Xue Permeability estimation from fracture calibration test analysis in shale and tight gas, Master of science-2012 Texas A&M University, 132 p.

### References

1. Gilfanov E.F.(2020) Comparison of the reservoir properties according to the test data of the study of the pressure drop curve during hydraulic fracturing and the pressure build-up curve Geology, geophysics and development of oil and gas fields, №9, p. 105-108 (in Russian)
2. Davletbaev A., Asalkhuzina G.F., Il'yasov A.M., Makhota N.A., Nuriev A., Nazargalin E.R., Pestrikov A.V., Sergeychev A.V (2016). Analiz krivykh padeniya davleniya posle nagnetatel'nykh testov pri gidrorazryve plasta, Neftyanoe khozyaystvo, № 11, p. 41–45. (in Russian)
3. Davletbaev A., Makhota N.A., Nuriev A.Kh., Urazov R.R., Pestrikov A.V., Sergeychev A.V., (2018). Planirovanie i analiz nagnetatel'nykh testov pri provedenii gidrorazryva v nizkopronitsaemykh plastakh s primeneniem, RN- grid, Neftyanoe khozyaystvo, № 10, p. 77–83, (in Russian)
4. . Urazov R.R., Maksimov A.A., Mumber P.S., Pestrikov A.V., Sergeychev A.V O pre-imushchestvakh primeneniya simulyatora gidroraz-ryva plasta pri analize kalibrovочnykh nagnetatel'nykh testov DFIT\_mini-GRP v GS s MGRP (21-22 .11.2018), SPE Material of konference, Tyumen' (in Russian)
5. Economides M.D, Olni R., Valko P. (2002) Unified Fracture Design. Bridging the Gap Between Theory and Practice, M, 221 p.
6. Salimov O.V., Salimov V.G. (2018) Osobennosti razvitiya treshchin gidro-razryva plasta na mestorozhdeniyakh Tatarstana Neftyanaya provintsiya, №1(13) URL: <http://www.vkro-raen.com> (in Russian) (accessed 07.07.2019)
7. Zheltov Yu.P.(1964) Gidravlicheskiy razryv plasta., M., Gostoptekhizdat. 98 p.(in Russian)
8. Ankushev Ya.E., (2018), Analiz mini-GRP pri provedenii gidrorazryva plasta, [https://cyberleninka.ru/article/n/analizmini\\_grp\\_pri\\_provedenii\\_gidrorazryva\\_plasta](https://cyberleninka.ru/article/n/analizmini_grp_pri_provedenii_gidrorazryva_plasta_Dostizheniya_nauki_i_obrazovaniya) Dostizheniya nauki i obrazovaniya, 1(23) (in Russian) (accessed 02.02.2020)
9. Yesiltepe C. (2011) Accessed drainage volume and recovery factors of fractured horizontal wells under transient flow. A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Golden, Colorado, p. 96 (in English)
10. Brown M. L. (2014), Analytical trilinear pressure transient model for multiply fractured horizontal wells in tight shale reservoirs, A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Golden Colorado, 118 p. (in English)
11. Ispas I. N. (1999) A coupled model for the prediction of fluid and reservoir properties from minifrac tests A Dissertation approved for the School of petroleum and geological engineering Norman, Oklahoma, 293 p. (in English)

12. Gaol A. M. L. (2014) Interference test analysis with two fractured horizontal wells. A Dissertation approved for the School of petroleum and geological engineering of the Colorado School of Mines, Colorado, 98 p. (in English)
13. Bourdet D. (2002) Well test analysis: The use of advanced interpretation models Paris, Amsterdam, Elsevier, 439 p. Publ. (in English)
14. Frick T.P., Brand C.W., Schlager B., Economides M.J. (1996) Horizontal Well Testing of Isolated Segments, SPE J. Vol. 1, № 3., P. 261–273. (in English)
15. Bruce R.Meyer, Lucas W.Bazan , (2010) Optimization of Multiple Transverse Hydraulic Fractures In Horizontal Wellbores, SPE 131732, 37 p. (in English)
16. Nolte, K.G.: (1989) A General Analysis of Fracturing Pressure Decline with Applications to Three Models, SPEFE 571-583, Dec. 1986, and also Chapter 14 and Appendix J of the SPE Monograph: Recent Advances in Hydraulic Fracturing 12 p. (in English)
17. Fan, Y.: (1997) A new Interpretation for Fracture Calibration Treatments, SPE 37401, p. 107-115. (in English)
18. Joshi S. D., Joshi Ph. D. (1990) Horizontal well technology. Technologies international, Inc., Tulsa, OK, USA, p. 302. (in English)
19. McClure Mark W., Horne R. (2013) Discrete fracture network modeling of hydraulic stimulation, Heidelberg, 96 p. (in English)
20. Samaniego, F.V. and Cinco-Lay H.:(1991) Transient Pressure Analysis for Variable Rate Testing of Gas Wells", SPE 21831, p. 249-258 (in English)
21. Han Xue (2012) Permeability estimation from fracture calibration test analysis in shale and tight gas Master of science, Texas A&M University., 132 p. (in English)

#### **Сведения об авторах:**

*Гильфанов Эдуард Фуатович*, главный специалист, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»  
Россия, 625000, Тюмень, ул. Республики, 41  
E-mail: Eduard.Gilfanov@lukoil.com

*Апасов Тимургалей Кабирович*, доцент кафедры РЭНГМ, Тюменский Индустриальный университет  
Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38  
E-mail: apasov-timur@mail.ru

#### **Authors**

*E.F. Gilfanov*, chief specialist, LUKOIL-Engineering Limited KogalymNIPIneft Branch Office in Tyumen  
41, Republic st., Tyumen, 625000, Russian Federation  
E-mail: Eduard.Gilfanov@lukoil.com

*T.K. Apasov*, Associate Professor of the Department of RANGM, Tyumen Industrial University  
38, Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation  
E-mail: apasov-timur@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 05.10.2023  
Принята к публикации 21.03.2024  
Опубликована 30.03.2024*