



УДК 622.276.1

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЫСЛОВОГО ВНЕДРЕНИЯ МАССИВНОГО ГИДРОРАЗРЫВА С КОНТРОЛЕМ ПРОРЫВА ВОДЫ

THE ANALYSIS OF RESULTS OF TRADE INTRODUCTION OF MASSIVE HYDRAULIC FRACTURING WITH WATER BREAK CONTROL

Салаватов Тулпархан Шарабуудинович

Доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент АН Азербайджана,
заведующий кафедрой нефтегазовая инженерия,
Азербайджанский государственный
университет нефти и промышленности
t_salavatov@mail.ru

Игбал Хуррам

магистр, докторант,
НИИ «Геотехнологические проблемы
нефти, газа и химии»
khurram@dewanpetroleum.com

Мамедов Рамиль Мухтар оглы

магистр, ассистент,
Азербайджанский государственный
университет нефти и промышленности
oilman25@mail.ru

Алиева Кямаля Азер кызы

докторант,
Азербайджанский государственный
университет нефти и промышленности
kema85@mail.ru

Аннотация. В работе представлен анализ влияния гидравлического разрыва в слабопроницаемом (относительно жестком), умеренно трещиноватом газовом коллекторе в складчатом поясе Сулайман, Среднеиндийский бассейн, Пакистан. Пласт можно охарактеризовать как песчаник хорошего качества, сланцевый песчаник или песчаный сланец с двойной пористостью. Первичная пористость природных трещин играет важную роль в продуктивности.

Работы по проведению массивного гидравлического разрыва были плохо смоделированы. Неконтролируемая система трещин служила увеличению добычи, но так как геометрия образованных трещин не контролировалась, это привело к тому, что трещины сообщались с водоносным горизонтом и как следствие, повлекло ускоренный рост обводнения и резкого снижения отбора углеводородов из этого коллектора.

Ключевые слова: гидравлический разрыв, прорыв воды, моделирование трещинообразования, увеличение добычи, пропант, механика горных пород.

Salavatov Tulparkhan Sharabudinovich

Doctor of Engineering, Professor,
Corresponding Member of AS of Azerbaijan,
Head of the Department Oil
and gas engineering,
Azerbaijani State University of Oil and Industry
t_salavatov@mail.ru

Igbal Hurram

Master, Doctoral Candidate,
Scientific Research Institute
«Geotechnological problems of oil,
gas and chemistry»
khurram@dewanpetroleum.com

Mamedov Ramil Mukhtar

Master, Assistant,
Azerbaijani State University of Oil and Industry
oilman25@mail.ru

Aliyeva Kyamal Azer

Doctoral Candidate,
Azerbaijani State University of Oil and Industry
kema85@mail.ru

Annotation. This paper presents the analysis on effect of hydraulic fracturing on poor permeable (relatively tight), moderately naturally fractured gas reservoir in Sulaiman Fold Belt, Middle Indus Basin of Pakistan. Well bedded sandstone, shaly sandstone or sandy shale, shale with dual porosity reservoir in its characteristics. Primary porosity with natural fractures play an important role in production. Massive hydraulic fracture job was poorly designed. Uncontrolled fractured system enhance production but as the geometry of the induced fracture was not controlled therefore the hydraulic fracture connected with aquifer of the reservoir and helped in rapid water encroachment in the well, resulted in water coning hence drastically reduced the hydrocarbon recovery from this reservoir.

Keywords: hydraulic fracturing, water encroachment, fracture job designing, production enhancement, rock mechanics.

Целью гидроразрыва является устранение ограничений в потоке вокруг ствола скважины для увеличения продуктивности и максимального извлечения.

В последние годы необходимость в увеличении продуктивности скважин послужили толчком к усовершенствованию оборудования и материалов, необходимых для проведения операций по гидравлическому разрыву пласта.



Более детальное исследование и понимание механизма трещинообразования, в конечном счете, послужило развитию массивного гидроразрыва пласта (МНФ). Эта технология была использована для создания трещин большой протяженности, которые изменяли геометрию потока вокруг скважины и обеспечивали увеличенную площадь для притока, что послужило тому, что множество «плотных» газовых пластов стали экономически привлекательны. Однако, в газовых пластах со средним значением проницаемости было обнаружено, что создание коротких высокопроводящих трещин, в отличие от массивных разрывов, наиболее рентабельно с экономической точки зрения [5].

Для оптимизации прибыли в газовых пластах со средней проницаемостью, обычно, требуется стимуляция скважин. В большинстве случаев, гидроразрыв обеспечивает наиболее эффективными и экономически выгодными показателями стимуляции. Некоторые виды обработки могут быть дорогостоящими и требовать больших инженерных усилий [4].

В работе показан процесс гидравлического разрыва с целью увеличения скорости притока в среднепроницаемых пластах в центральном индийском бассейне (Пакистан).

Скважина X-1 расположена в среднеиндийском бассейне, Пакистан. Она пробурена на глубину 2770 метров до меловых песчаных отложений и продуцирует газ. Эта скважина была выбрана ввиду низкой проницаемости цементированного кварцевого песчаника. Начальная пористость пласта плохая из-за того, что зерна кварца цементированы под давлением и составляет менее 5 % (рис. 1). Этот пласт относится к типу II [3]. Скважина добывала незначительные объемы газа и конденсата, но после извлечения бурового раствора и работ кислотной обработки объемы извлечения были доведены до коммерчески приемлемых. Ввиду низкой проницаемости и плотности песков здесь были запланированы работы по массивному гидроразрыву, которые проводились сервисной компанией с целью увеличения дальнейшей добычи.

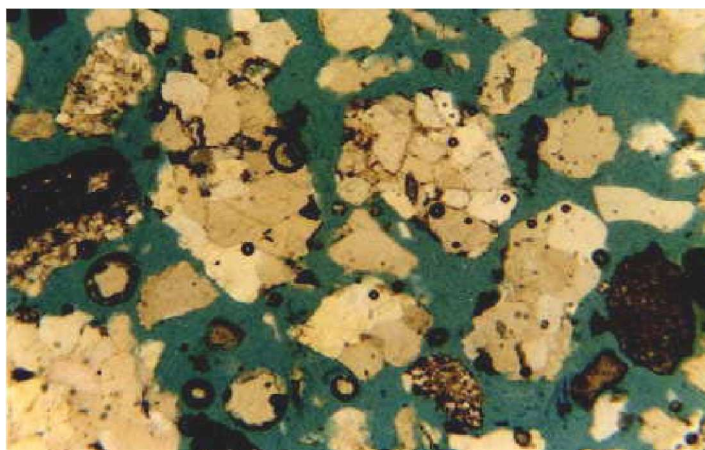


Рисунок 1 – Образец породы коллектора с указанием на слабую пористость из-за плотной усадки зерен сланцевого песчаника

Результаты кислотной обработки. Из-за ограниченного входа и конвергенции потока показатель продуктивности скважины значительно снизился и потребовалась дополнительная перфорация. Поэтому для устранения ограниченности входа и снижения скин (вызванного повреждением пласта в процессе бурения) была выполнена дополнительная перфорация и работы по обработке кислотой в том же интервале, что привело к увеличению продуктивности более чем в 5 раз и в 8 раз увеличилось текущее давление на дросселях того же размера.

После успешной кислотной обработки был запланирован массивный гидравлический разрыв, который проводился на том же интервале. В итоге скважина была завершена комбинацией сборных узлов, то есть НКТ 2-3/8 X 2-7/8 дюймов и 5 фиксированных пакеров на глубине 2490 метров. Также скважина была протестирована на интеграцию с заканчиванием (CIT) и было отмечено увеличение продуктивности после кислотной обработки.

ГРП: моделирование и прогноз. Вследствие наличия значительных извлекаемых запасов и оптимизации вложений в дополнительное бурение был запланирован ГРП, общий эффект которого сократил инвестиции в проект на 42 % [2]. В этом исследовании была построена композиционная модель скважины с использованием данных о тестировании с целью проверки модели. Модель была построена с использованием программного обеспечения Procade (софт для анализа скважин, Schlumberger), которая соответствовала текущей производительности скважины.

Затем был проведен прогноз по 4 сценариям:

- 1) сценарий (основной): первоначальные/естественные условия в скважине
- 2) сценарий: фракционирование нижней части пласта.



3) сценарий: фракционирование средней части пласта.

4) сценарий: фракционирование верхней части пласта.

Результаты моделирования всех сценариев приведены в таблице 1, где накопленная добыча также сопоставлялась с экономической рентабельностью проекта.

Таблица 1

Сценарий развития	Начальная добыча (MMSCFD)	Накопленная добыча (2 года) (BSCF)	Прирост накопленной добычи (BSCF)	Время окупаемости (дни)
Основной	7,9	6,2	–	–
Сценарий 1	13,9	10,5	4,3	67
Сценарий 2	13,9	13,4	7,2	67
Сценарий 3	10,9	10	3,8	134

Применение ГРП. На основе приемлемых результатов интерпретации с помощью моделирования было запланировано и проведено две операции ГРП. Первые работы по ГРП были выполнены согласно сценариям 2 и 3, тогда как вторая работа осуществлялась в соответствии сценарию 1. После проведенных работ скважина была закончена посредством спуска НКТ 4-1/2 дюйма с 5-тидюймовым обратным пакером, как это было предложено узловым анализом.

Первичные работы ГРП. Первоначальные работы перед проведением ГРП заключались в определении скорости и давления для закачки. С целью увеличения потенциала скважины и эффективности процесса были изучены и подтверждены определенные критические параметры.

Эффективность наблюдалась при 20 % значении фракционирования. Принимая это во внимание, объем жидкости гидроразрыва был увеличен, а максимальная концентрация проппанта снижена для достижения оптимальной геометрии трещины [7]. Основной процесс был начат при скорости закачки 23 барреля жидкости в минуту при давлении 7465 psi. На предварительном этапе падение давления можно было объяснить ростом высоты трещины, за которым следует более значительное снижение давления на стадии 1 PPA из-за повышенного гидростатического давления, вызванного массой проппанта. Как только расклинивающий наполнитель вводится через 2-7/8 дюймовую колонну давление начинает увеличиваться из-за трения между проппантом и НКТ. Этот процесс был значительным на 2, 3, 4, 5 и 6 PPA стадиях. На этапе 6 PPA наблюдался рост давления, как следствие того, что проппант начал уплотняться в направлении трещины. Сводная информация об объемах закачиваемой жидкости и проппанта приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Отчет об объемах откачки во время 1-го гидравлического разлома

No	Описание жидкости	Объем
Предварительная обработка данных		
1	4 % закачка KCl	131.9 bbls
2	Закачка калибровочной жидкости	650.0 bbls
3	Вытесненная жидкость	55.0 bbls
Основной разрыв		
1	Основная обработка	1899.5 bbls
2	Промывочная жидкость	50.0 bbls
Общее количество закачанного проппанта		
148,800 lbof 20/40 Carbo-Prop		
Количество проппанта в породе		
145,000 lbof 20/40 Carbo-Prop		

Показатели закачки, наблюдаемые в процессе работ ГРП показаны на графике на рисунке 2.

Вторичные работы ГРП. Из-за большого интервала перфорации и требований к большей протяженности образовавшейся трещины, песчанная пробка была помещена с целью изоляции нижней перфорированной зоны (зона первой трещины) и была выполнена вторая операция ГРП. Так же как и в первом случае, были проведены предварительные работы для определения скорости и объемов закачки жидкости и проппанта. Основной процесс закачки был начат при скорости 20 баррелей



жидкости в минуту при том же давлении. На предварительной стадии рост давления был соизмерим с длиной трещины. Как только была реализована стадия 1 Ppa падение давления было отмечено как следствие гидростатического уровня в стволе скважины. На стадиях 5, 6 и 7 Ppa проппант начинает поступать через 2-7/8 дюймовую колонну труб, а давление растет из-за трения между расклинивающим наполнителем и НКТ. На стадиях от 4 до 7 PPA отмечено восстановление давления, как следствие того, что проппант уплотняется в образовавшейся трещине.

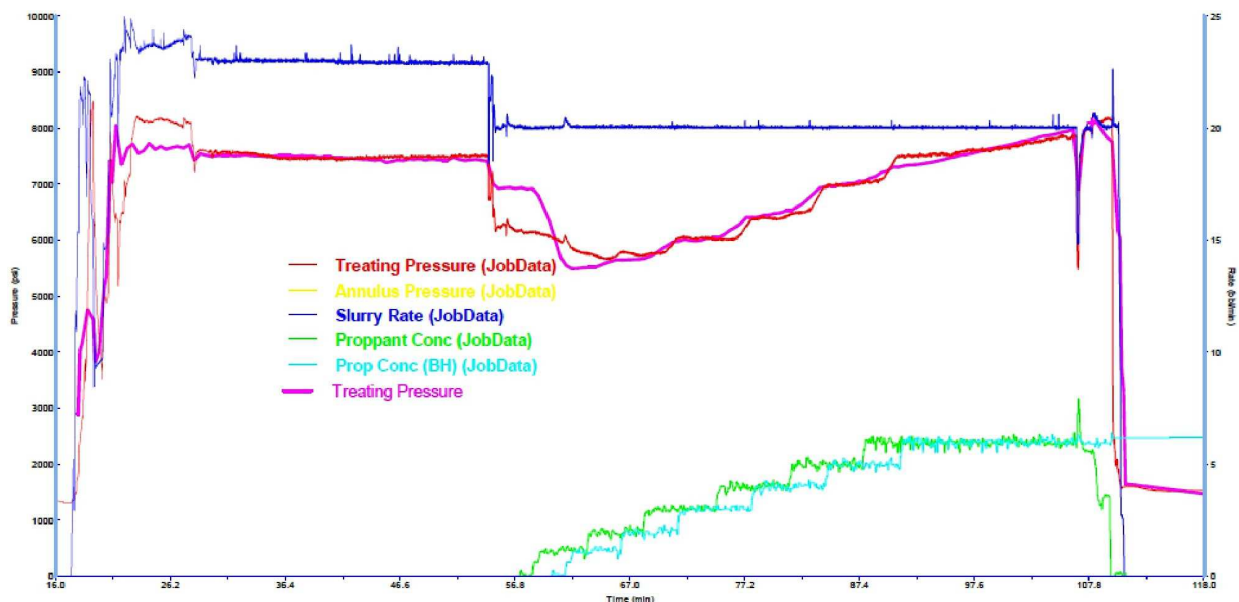


Рисунок 2 – Изменение давления во время первичного ГРП

Результаты операций ГРП. После проведения операций ГРП добыча газа увеличилась более чем в 4 раза (40 MMSCFD), но, в дальнейшем, после очистки ствола скважины объемы добываемой воды также возросли до отметки 220–250 баррелей в сутки. Лабораторные анализы подтвердили наличие пластовой воды.

Во время оценки работ с помощью симулятора было отмечено, что из-за отсутствия данных анализа керна и недостаточной информации о механике породы, можно получить лишь 60 % от длины и 55 % от высоты запланированной проектной трещины, в то время как ширина ее увеличивалась на 230 % в сравнении с проектной.

Выводы

1. ГРП в песчаных сланцах проводился без надлежащего планирования. Несмотря на успешность работ с механической точки зрения, они стали причиной катастрофического снижения показателей извлекаемых запасов. Вертикальное расширение трещины повредило различные пласты, и трещина соединила их с водоносным горизонтом, что в конечном итоге полностью остановило (блокировало) добычу газа.

2. В этой работе осуществление операций было критически пересмотрено и установлено, что не были учтены ни геологические характеристики коллектора, ни газо-водяной контакт. Более того, анализ трещин показал, что их ориентация, ширина апертуры и их частота, также не были приняты во внимание. Оценка качества коллектора тоже оказалась ненадежной из-за отсутствия данных отбора керна. Работы ГРП проводились в последовательности песчано-сланцевых пластов с различными режимами давления, что явилось причиной входа в водоносный горизонт и как следствие увеличение добычи воды с катастрофическим снижением добычи газа.

3. Работы ГРП не дали ожидаемых результатов по причине неправильного выбора скважины и не принятия во внимание геологических факторов. Структурное позиционирование скважины всвязи с распределением трещин без анализа режима напряжений были основными причинами провала работ.

Литература:

1. Abou-Sayed, A., (1987): Hydraulic Fracturing, A Technology For All Time: IN Reservoir Stimulation edited by Economides, Kenneth and Nolte, published by Schlumberger, 3rd ed., p. 1–18.
2. Aly A. M., A.H. El-Banbi, S.A. Holditch, M. Wahdan, N. Salah, N.M. Aly, P. Boerrigter (2001): Optimization of Gas Condensate Reservoir Development by Coupling Reservoir Modeling and Hydraulic Fracturing Design; SPE Middle East Oil Show, 17–20 March 2001, Manama, Bahrain.



3. Augillera R., (1980): Naturally fractured reservoir, Penne well books, Tulsa, 703p.
4. Britt, L.K. (1985): Overview of Current Hydraulic Fracturing Design and Treatment Technology – Part 1. J Pet Technol 35 (4): 677-687.SPE-10039-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/10039-PA>.
5. Britt, L.K (1985): Optimized Oil well Fracturing of Moderate-Permeability Reservoirs. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, USA, 22–26 September.SPE-14371-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/14371-MS>.
6. Carbonell R. and E. Detournay (1995): Modeling fracture initiation and propagation from a pressurized hole: A dislocation-based approach. Proceedings of the 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Balkema, P. 465–470.
7. Economides M. J. and K.G. Nolte (2000): Reservoir Stimulation, third edition. IN Reservoir Stimulation edited by Economides, Kenneth and Nolte, Schlumberger , 3rd ed., p. 421–431.
8. Fairhurst C., M.P. Hardy ,B. Singh (1973): Estimation of the mechanical properties of rock masses 22T,154R US BUR.MINES,FINAL TECHNICAL REPORT,1973,197P
9. Gidley, J.L., Holditch, S.A., Nierode, D.E. (1989): An Overview of Hydraulic Fracturing. In Recent Advances in Hydraulic Fracturing, Richardson, Texas: Monograph Series, SPE. P. 1–38.
10. M. Sheydaemehr, B. Sedaei sola and A. Vatani (2015): Geomechanics and Hydraulic Fracturing; 77th EAGE Conference and Exhibition.
11. Niemeier B.L and M. R. Reinart Veatch Jr., (1983): Hydraulic Fracturing of a Moderate Permeability Reservoir, Kuparuk River Unit. Internal report of Arco Alsaka.
12. Rummel F., (1987): Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing measurement. Fracture Mechanics of Rocks, B.K. Atkinson (ed.), Academic Press, P. 217–239.