

ПОПЛАВСКИЙ Никита Александрович,
студент,
Нижевартовский государственный университет,
e-mail: poplavskii nikita@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОСТАДИЙНОГО И МНОГОСТАДИЙНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Аннотация. Статья посвящена сопоставлению эффективности одностадийного и многостадийного гидравлического разрыва пласта (ГРП) при освоении горизонтальных скважин в низкопроницаемых коллекторах. Рассмотрены технологические схемы (поинтервальная перфорация с пробками, муфтовые системы), геомеханические ограничения и роль эффекта тени напряжений при плотном размещении перфорационных кластеров. Для сравнения предложен набор критериев: прирост дебита и извлечения, охват стимулированного объема (стимулированный объем пласта), удельные капитальные и операционные затраты, управляемость обработки и операционные риски. На основе обобщения открытых источников и типовых инженерных допущений показано, что многостадийный ГРП, как правило, обеспечивает больший охват пласта и более устойчивый прирост добычи, но требует строгого контроля дизайна стадий, плотности кластеров и распределения проппанта, иначе наблюдается падение эффективности кластеров и рост риска осложнений.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, горизонтальная скважина, многостадийный ГРП, поинтервальная перфорация с пробками, муфтовые системы, эффект тени напряжений, стимулированный объем пласта, эффективность разработки.

POPLAVSKII Nikita Aleksandrovich,
student,
Nizhnevartovsk State University

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SINGLE-STAGE AND MULTI-STAGE HYDRAULIC FRACTURING IN HORIZONTAL WELLS

Annotation. The article is devoted to comparing the efficiency of single-stage and multi-stage hydraulic fracturing (HF) in the development of horizontal wells in low-permeability reservoirs. The technological schemes (interval perforation with plugs, coupling systems), geomechanical constraints, and the role of the stress shadow effect in the dense placement of perforation clusters are considered. A set of criteria is proposed for comparison: increase in flow rate and recovery, coverage of the stimulated volume (stimulated reservoir volume), specific capital and operating costs, process control, and operational risks. Based on a summary of open sources and typical engineering assumptions, it is shown that multi-stage hydraulic fracturing generally provides greater reservoir coverage and more sustainable production growth, but requires strict control over the design of stages, cluster density, and proppant distribution, otherwise there is a decrease in cluster efficiency and an increase in the risk of complications.

Key words: hydraulic fracturing, horizontal well, multi-stage hydraulic fracturing, interval perforation with plugs, coupling systems, stress shadow effect, stimulated reservoir volume, development efficiency.

Введение

Технологии горизонтального бурения и интенсивного ГРП стали ключевыми для разработки низкопроницаемых и сланцевых коллекторов. Если одностадийная обработка создаёт ограниченную по протяжённости зону повышенной проводимости, то многостадийный подход предназначен для равномерного стимулирования

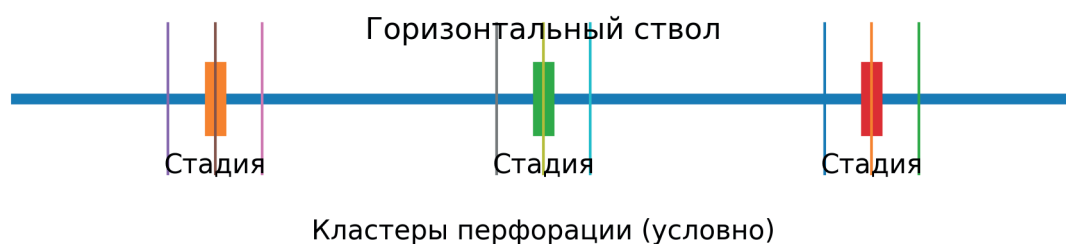
всей латерали и вовлечения в фильтрацию ранее недренируемых объёмов. Практический выбор стратегии зависит от геологии, доступной инфраструктуры, ограничений по ННК (насосной мощности) и требований к экономике проекта. [6; 7]

Технологические схемы одностадийного и многостадийного ГРП

Одностадийный ГРП в горизонтальной сква-

Многостадийный ГРП предполагает поинтервальное воздействие вдоль горизонталь-

Рисунок 1. Схема размещения стадий и кластеров перфорации в горизонтальной скважине.



Для сопоставления эффективности в статье используются нормированные показатели (0-1), позволяющие сравнивать подходы без привязки к конкретному месторождению: (1) технологический эффект (прирост дебита/извлечения), (2) охват стимулированного объема пласта, (3) управляемость и воспроизводимость дизайна, (4) капитальные затраты на единицу длины латерали, (5) операционные риски (скрин-аут, недорас-

Нормирование каждого показателя x выполняют по выражению: $x_{\text{норм}} = (x - x_{\text{мин}}) / (x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}})$. Интегральную оценку рассчитывают как сумму: $a_1 \cdot k_1 + a_2 \cdot k_2 + a_3 \cdot k_3 + a_4 \cdot k_4 + a_5 \cdot k_5$, где $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 1$; коэффициенты a_1 – a_5 выбирают в зависимости от целей разработки (приоритет дебита, ограничения по затратам или минимизация рисков).

Таблица 1. Сравнение технологических параметров.

Параметр	Ед.	Одностадийный	Многостадийный
Длина стимулируемого интервала	м	100–400	800–2500
Число стадий	шт.	1	10–40
Кластеры в стадии	шт.	2–6	3–6
Шаг кластеров	м	20–60	8–20
Типичная проблема	—	ограниченный охват	эффект тени напряжений, снижение эффективности кластеров

Ключевое отличие многостадийного ГРП связано с взаимодействием одновременно или последовательно растущих трещин. Эффект тени напряжений приводит к изменению поля напряжений между соседними трещинами и может как увеличивать сложность сети, так и подавлять

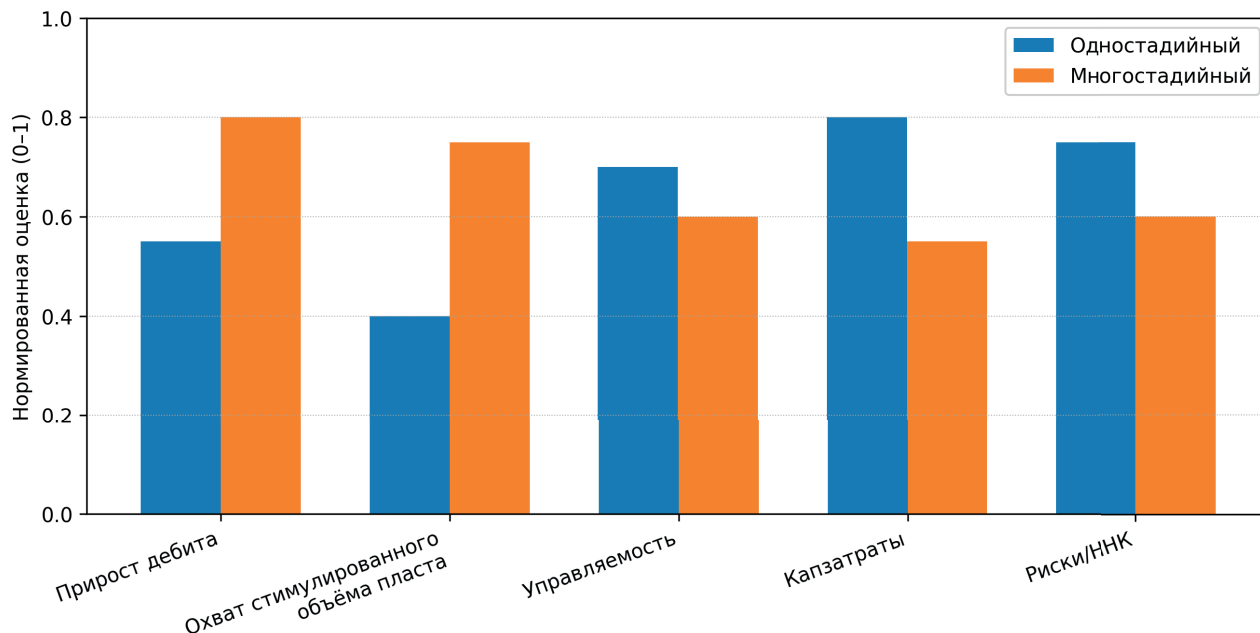
раскрытие части кластеров, снижая равномерность распределения проппанта. Чувствительными параметрами являются вертикальная неоднородность минимального горизонтального напряжения и выбранный шаг кластеров; в ряде случаев оптимизация требует моделирования и калибровки по диагностике (распределённые акустические измерения, микросейсмический мони-

торинг, диагностический тест падения давления).

Для одностадийной обработки геомеханическое взаимодействие трещин обычно слабее из-за меньшего числа активных источников, что повышает воспроизводимость результата. Однако

ограниченный охват вдоль латерали приводит к недоиспользованию потенциала горизонтального ствола, особенно в неоднородных коллекторах. [6]

Рисунок 2. Сравнение нормированных показателей эффективности (примерная оценка).



Выводы

1) Многостадийный ГРП обеспечивает более высокий охват стимулированного объема пласта и, как правило, больший устойчивый прирост добычи по сравнению с одностадийной обработкой, что особенно важно для низкопроницаемых коллекторов.

2) Цена повышения охвата - рост сложности и требований к качеству исполнения: выбор длины стадий, плотности кластеров, ограничение вли-

яния эффекта тени напряжений и контроль распределения проппанта критичны для сохранения эффективности кластеров. [2; 6]

3) Одностадийный ГРП остаётся рациональным решением при коротких латералиях, ограничениях по инфраструктуре, необходимости точечного воздействия или при высокой неопределённости модели пласта, когда предпочтительнее минимизировать риски и стоимость эксперимента. [6]

Список литературы:

[1] Ян Цз., Сун Цз., Ван Ю. Влияние эффекта тени напряжений при многостадийном гидроразрыве в плотных коллекторах: численный анализ с учётом шага кластеров и последовательности разрыва // Геомеханика и геофизика георесурсов. 2024. Т. 10. Статья 183.

[2] Сингх А., Зобак М., Макклур М. Оптимизация многостадийного гидроразрыва в нетрадиционных коллекторах с учётом изменения напряжений по глубине: доклад Общества инженеров-нефтяников. 2020.

[3] Нгуен Х. Т., Ли Ч. Х., Эльраис К. А. Обзор моделирования гидравлических трещин типа Пикей-Эн // Журнал нефтяной науки и инженерии. 2020. Т. 195. Статья 107607.

[4] Крессе О., Вэн С., Гу Х., У Ж. Численное моделирование взаимодействия гидравлических трещин в сложных естественно-трещиноватых породах // Механика горных пород и инженерная геология. 2013. Т. 46. С. 555–568.

[5] Шах М. С., Шах С. Н. Сравнительная оценка механических и химических методов перераспределения рабочей жидкости при гидроразрыве в горизонтальных скважинах // Нефтяная наука. 2023. Т. 20(6). С. 3582–3597.

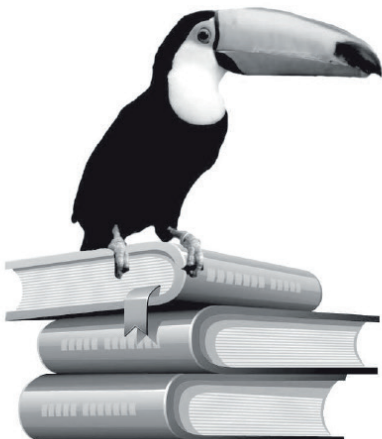
[6] Бейкер Хьюз. Многостадийное заканчивание горизонтальных скважин: технологический каталог оборудования. Хьюстон: Бейкер Хьюз, 2023. 64 с.

[7] Экономидес М. Дж., Нолте К. Г. Стимулирование продуктивности пластов. 3-е изд. Хобокен: Издательство «Уайли», 2000. 856 с.

References:

- [1] Yang Z., Song Z., Wang Y. Effect of stress shadow effect on multistage hydraulic fracturing in tight reservoirs: Numerical analysis considering cluster spacing and fracture sequence // *Geomechanics and Geophysics of Georesources*. 2024. Vol. 10. Article 183.
- [2] Singh A., Zoback M., McClure M. Optimization of multistage hydraulic fracturing in unconventional reservoirs considering stress-depth variation: Report of the Society of Petroleum Engineers. 2020.
- [3] Nguyen H. T., Lee C. H., Elrais K. A. Review of modeling of PKN-type hydraulic fractures // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 195. Article 107607.
- [4] Kresse O., Wen S., Gu H., Wu J. Numerical Modeling of Hydraulic Fracture Interaction in Complex Naturally Fractured Rocks // *Rock Mechanics and Engineering Geology*. 2013. Vol. 46. pp. 555–568.
- [5] Shah M. S., Shah S. N. Comparative Evaluation of Mechanical and Chemical Methods of Working Fluid Redistribution during Hydraulic Fracturing in Horizontal Wells // *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20(6). pp. 3582–3597.
- [6] Baker Hughes. Multistage Horizontal Well Completions: A Technology Catalog of Equipment. Houston: Baker Hughes, 2023. 64 pp.
- [7] Economides M.J., Nolte K.G. Stimulating Reservoir Productivity. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2000. 856 p.





ЮРКОМПАНИ

www.law-books.ru

Юридическое издательство
«ЮРКОМПАНИ»

Издание учебников,
учебных и методических
пособий, монографий,
научных статей.

Профессионально.

В максимально
короткие сроки.

Размещаем
в РИНЦ, E-Library.