

УДК 622.276.66

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА¹

Ибрагим Мохаммед Зрар,

Магистрант

Самарский государственный технический университет,

Институт нефтегазовых технологий

г. Самара, Россия

e-mail: Mohammed.zrar987@gmail.com

Аннотация

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одной из ключевых технологий повышения продуктивности скважин в низкопроницаемых коллекторах и при разработке трудноизвлекаемых запасов. Однако результаты ГРП часто отличаются даже в пределах одного месторождения, потому что итоговая эффективность зависит не только от объема закачки или массы проппанта, но и от согласованности дизайна с геологическими условиями, текущим состоянием разработки и ограничениями исполнения. В статье акцент сделан на последовательности действий: от отбора скважин кандидатов и подготовки исходных данных до настройки параметров дизайна, контроля рисков и обязательной обратной связи по фактическим данным проведения работ. Показано, что на практике оптимизация чаще означает поиск баланса между геометрией трещины, проводимостью проппантной пачки, равномерностью работы кластеров в горизонтальных скважинах и экономикой операции. Отдельно отмечена роль диагностики качества выполненного ГРП по данным гидродинамического мониторинга, а также необходимость учета влияния реологических свойств жидкости и качества воды на остаточную проводимость и проницаемость. В качестве результата предложен единый алгоритм оптимизации с набором практических решений, которые помогают снижать вариативность результатов и повышать прогнозируемость эффекта.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, оптимизация ГРП, дизайн трещины, многостадийный ГРП, продуктивность скважин.

¹ Научный руководитель; **Ковалева Галина Анатольевна**, к.т.н., доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Института нефтегазовых технологий; ga-kovaleva@yandex.ru; Самарский государственный технический университет. Научный руководитель; **Мохсен Али Мохаммед Абдулла** - старший преподаватель кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Института нефтегазовых технологий; alhalmyali@gmail.com; Самарский государственный технический университет.

Scientific supervisor; **Kovaleva Galina Anatolyevna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Oil and Gas Technologies; ga-kovaleva@yandex.ru; Samara State Technical University.

Scientific supervisor; **Mohsen Ali Mohammed Abdullah**, Senior Lecturer of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Oil and Gas Technologies; alhalmyali@gmail.com; Samara State Technical University.

OPTIMIZATION OF HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGY

Ibrahim Mohammed Zrar,

Master's Student

Samara State Technical University,

Institute of Oil and Gas Technologies

Samara, Russia

mail: Mohammed.zrar987@gmail.com

ABSTRACT

Hydraulic fracturing (HF) is one of the key technologies for increasing well productivity in low-permeability reservoirs and in the development of hard-to-recover reserves. However, HF outcomes often differ even within the same field because overall performance depends not only on the pumped volume or proppant mass, but also on how well the treatment design matches geological conditions, the current state of field development, and operational constraints. This paper emphasizes a step-by-step workflow, from candidate well selection and preparation of input data to tuning design parameters, managing risks, and ensuring feedback based on actual job data. It is shown that, in practice, optimization most often means finding a balance between fracture geometry, the conductivity of the propped fracture, the uniformity of cluster performance in horizontal wells, and treatment economics. The role of post-fracturing quality diagnostics using reservoir and well monitoring data is highlighted, as well as the need to account for the influence of fluid rheology and water quality on residual conductivity and permeability. As a result, a unified optimization algorithm is proposed together with a set of practical solutions that help reduce variability and improve the predictability of outcomes.

Keywords: hydraulic fracturing, HF optimization, fracture design, multistage hydraulic fracturing, well productivity.

Гидравлический разрыв пласта широко применяется как метод интенсификации добычи, особенно в условиях низкой проницаемости и высокой неоднородности коллектора. При этом одинаковые по стоимости операции нередко дают разный результат. На уровне промысла это проявляется как нестабильность прироста, ускоренный рост обводненности, неравномерная работа стадий в горизонтальных скважинах и быстрый спад эффекта. Такая вариативность обычно связана с тем, что дизайн ГРП проектируется по усредненным допущениям и недостаточно учитывает текущие условия разработки, включая давление, близость работающих скважин и распределение напряжений. Поэтому задача оптимизации заключается не в механическом увеличении объемов и концентраций, а в настройке параметров под конкретный объект и в постоянной корректировке решений по данным фактического исполнения [1].

Оптимизация ГРП, в прикладном смысле, является последовательным выбором кандидатов, параметров дизайна и режима проведения работ так, чтобы ожидаемый технологический эффект был устойчивым, а риски осложнений и экономические потери оставались приемлемыми. Для магистерского исследования важно опираться на измеряемые показатели и на ограниченный набор управляемых параметров. Это позволяет не усложнять модель до недоступного уровня и при этом получить практический результат, который можно проверить на данных эксплуатации.

В первую очередь требуется качественная подготовка исходных данных. Минимальный набор включает сведения о коллекторе и его неоднородности, данные о текущем пластовом давлении, информацию о фоновой разработке и близости добывающих и нагнетательных скважин, а также параметры заканчиваний и ограничения по насосному оборудованию. Дополнительно полезны результаты интерпретации гидродинамических исследований, поскольку они позволяют оценить качество вскрытия коллектора и динамику деградации проводимости трещин во времени [2]. На промысле это важно потому, что даже при хорошем старте проводимость трещины может снижаться, а часть кластеров в горизонтальном стволе может практически не участвовать в притоке.

Оптимизация обычно начинается с корректного определения цели. Наиболее частыми критериями являются прирост дебита и накопленной добычи за выбранный горизонт времени, снижение удельной стоимости дополнительной добычи и уменьшение вероятности нежелательных последствий, таких как прорыв воды, пескопроявления, а также взаимодействие трещин между скважинами при плотном бурении. Если объект разрабатывается горизонтальными скважинами с многостадийным ГРП, то к целям добавляется повышение равномерности работы кластеров и снижение разброса результатов между стадиями. Практика показывает, что именно равномерность часто определяет итоговую эффективность, потому что неработающие кластеры фактически превращают часть затрат в потери [3].

После постановки цели важно перейти к параметрам, которые реально поддаются управлению. Наиболее значимыми считаются целевая геометрия трещины и ее проводимость, масса и гранулометрия проппанта, тип жидкости и ее реология, а также режим закачки, включая расход и график роста концентрации проппанта. Геометрия трещины определяет радиус дренирования, но ее увеличение имеет смысл только до тех пор, пока трещина остается в продуктивном интервале и не создает дополнительных рисков. Проводимость трещины задает способность удерживать дебит на поздних сроках, и именно здесь качество проппирования становится критическим. Для практической оптимизации удобна логика, при которой сначала обеспечивается стабильная проводимость и предсказуемая работа по стадиям, а затем уже наращиваются геометрические параметры, если это не ухудшает рисковый профиль.

Отдельный блок оптимизации связан с подбором жидкости ГРП и качеством воды. Реологические свойства влияют на транспорт проппанта, на утечки в пласт и на вероятность повреждения призабойной зоны. При этом использование альтернативных источников воды и высокая минерализация могут быть допустимыми при подтверждении приемлемых показателей остаточной проницаемости и проводимости проппантной пачки. Лабораторные исследования показывают, что при грамотном подборе рецептуры жидкость на основе воды с высокой минерализацией может обеспечивать близкие значения остаточной проводимости и проницаемости, что делает такие решения перспективными в условиях ограничений по водоснабжению и логистике. Для магистерской работы это важно тем, что оптимизация может учитывать не только добычу, но и снижение затрат и операционных рисков при обеспечении качества [4].

В дизайне проппирования существенную роль играет не только общая масса, но и распределение концентрации по этапам. Слишком резкий рост концентрации может повышать риск преждевременного экранонта и недопроппирования дальних участков трещины. Слишком мягкий режим может привести к недостаточной проводимости в зоне возле ствола. Для целей оптимизации важно фиксировать, какой именно элемент улучшает результат, и подтверждать это сравнением партий работ при близких геологических условиях.

При многостадийном ГРП в горизонтальных скважинах критическим вопросом становится оптимизация стадий и кластеров. Здесь технологическая проблема часто состоит в том, что фактическое распределение приема по кластерам отличается от проектного, и часть интервалов не раскрывается или быстро теряет проводимость. В практическом варианте для промысла можно использовать набор правил: не перегружать стадию чрезмерным числом кластеров, контролировать шаг кластеров, анализировать фактические давления и признаки дисбаланса приема, а затем корректировать дизайн в следующей партии скважин [5]. Параметры оптимизации ГРП и промысловые индикаторы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Практические параметры оптимизации ГРП и ожидаемый эффект

Группа параметров	Что настраиваем	Зачем это нужно (ожидаемый эффект)	Основные риски при «переборе»
Геометрия трещины	целевая полудлина/высота, проводимость	расширение зоны дренирования, снижение скин-эффекта	контакт с водой/газовой шапкой, взаимодействие с соседними скважинами
Проппант	тип/фракция, общая масса, концентрация по этапам	удержание проводимости, устойчивость к напряжению закрытия	рост затрат, повреждение призабойной зоны, невынос проппанта
Жидкость и реология	тип системы (сликвотер/гель/гибрид), вязкость, добавки	перенос проппанта, контроль утечек, стабильность закачки	остатки геля/полимеров, ухудшение проницаемости, рост осложнений
Насосный режим	расход, давление, объемы по этапам	управление раскрытием и ростом трещины, «дотягивание» проппанта	экрэн-аут, аварийная остановка, неравномерность по кластерам
Перфорация/кластеры (ГС)	число кластеров, шаг, схема перфорации	балансировка приема, более равномерная работа стадий	часть кластеров «молчит», перерасход на неэффективные интервалы
Учет НДС и разработки	корректировка по давлению/напряжениям, геомодель	снижение риска «ухода» трещины, нежелательных пересечений	ошибка модели → неправильные решения

Составлено автором по материалам [2,5].

Важной частью оптимизации является диагностика качества выполненного ГРП по данным эксплуатации и гидродинамического мониторинга. Если есть возможность непрерывного измерения забойного давления и его анализа на ранних режимах течения, то можно оценивать эффективность вскрытия, динамику изменения проводимости трещин и потенциал для корректировки режима работы или для повторной стимуляции. Такой

подход удобен тем, что опирается на доступные промысловые данные и позволяет формировать практические рекомендации без сложных вычислительных моделей.

Технико-экономическая оценка должна быть встроена в оптимизацию с самого начала. Увеличение объемов закачки, удлинение трещины или переход на более дорогие материалы могут повысить дебит, но не всегда улучшают экономику. Поэтому разумно сравнивать варианты по ожидаемой дополнительной добыче и по удельной стоимости результата, а также учитывать вероятность негативных сценариев, например роста обводненности или межскважинного взаимодействия. В качестве прикладного инструмента можно использовать сценарный расчет, когда для каждого варианта дизайна задаются три уровня эффекта, базовый, оптимистичный и консервативный, а затем выбирается решение с наилучшим соотношением ожидаемой выгоды и риска [6].

Итоговый алгоритм оптимизации в практической постановке выглядит так. Сначала формируется пул скважин кандидатов на основе геологии и истории разработки. Затем задается несколько вариантов дизайна, которые отличаются ключевыми параметрами, например массой проппанта, типом жидкости и плотностью кластеров. Далее выполняется предварительная проверка ограничений по давлению, насосам и рискам по воде, после чего выбираются один или два варианта для опытной партии. После проведения работ обязательно собираются фактические данные по режиму закачки, по отклонениям от плана, по дебитам и динамике давления. На основе этого делается корректировка дизайна и критериев отбора на следующую партию. Такой цикл проектирование, факт, корректировка позволяет уменьшать разброс результатов и постепенно выходить на локальный оптимум для конкретного месторождения [7].

В заключении, оптимизация технологии гидравлического разрыва пласта является задачей прикладного управления параметрами дизайна и режимом работ с учетом геологии, текущего состояния разработки и экономических ограничений. На практике наибольший эффект дают решения, которые повышают предсказуемость результата, обеспечивают устойчивую проводимость трещины и улучшают равномерность работы стадий и кластеров в горизонтальных скважинах. Существенным элементом оптимизации является контроль качества выполненного ГРП по данным гидродинамического мониторинга, поскольку он позволяет не только оценить эффективность, но и выявить причины деградации проводимости во времени. Дополнительные резервы связаны с подбором жидкости и контролем качества воды, включая возможность применения высокоминерализованных источников при подтверждении приемлемых лабораторных показателей. Для магистерского уровня работы рационально использовать итерационный подход и опираться на доступные промысловые данные, фиксируя, какие изменения дизайна дают измеримый эффект, и подтверждая выводы сравнением партий работ в близких условиях.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный алгоритм оптимизации может использоваться при проектировании гидравлического разрыва пласта для повышения эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов и снижения технологических и экономических рисков.

Ограничения исследования. Следует отметить, что данное исследование носит аналитический характер и основано на обобщении результатов научных публикаций и промысловой практики. В работе не проводились собственные лабораторные или промысловые эксперименты. Предложенный алгоритм оптимизации:

- ↓ Корректировка параметров ГРП
- ↓ Анализ фактических результатов
- ↓ Проведение опытной партии
- ↓ Проверка технологических ограничений

↓ Разработка вариантов дизайна ГРП
↓ Подготовка исходных данных
↓ Выбор скважин-кандидатов –
может рассматриваться как методический подход, который требует дальнейшей проверки на конкретных месторождениях.

Список литературы:

1. Никонорова А.Н., Ворон К.А., Кременецкий М.И., Борисов В.В., Бахмутов А.В., Воронин Д.А., Лазуткин Д.М. Оценка динамики добычных возможностей нефтегазовых горизонтальных скважин с многостадийным ГРП по результатам гидродинамических исследований на основе диагностики ранних режимов течения // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 6. С. 50-56.
2. Султанов Ш.Х., Мухаметшин В.Ш., Стабинскас А.П., Велиев Э.Ф., Чураков А.В. Исследование возможности использования воды с высокой минерализацией для гидравлического разрыва пласта // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 950-962.
3. Садыков А.М., Хазиев А.М., Сыпченко С.Э. и др. Метод инициации и развития трещины для высокорасходных ГРП в нефтематеринских коллекторах // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 7. С. 96-101.
4. Tang H., Ruan Q., Zhang L., Hu D., Qin J., Zhao Y., Ye Y. Intelligent optimization of fracturing stage and cluster parameters for tight oil reservoir // Petroleum. 2025. Vol. 11, Iss. 1. P. 56-70.
5. Xu J., et al. Fracture Simulation and Parameter Optimization of Hydraulic Fracturing in Shale Oil Reservoir // Thermal Science. 2025. Vol. 29, №. 2B. P. 1557-1562.
6. Савенок О.В., Чуйкова Е.П. Обоснование проведения гидроразрыва пласта на завершающей стадии разработки нефтяного месторождения // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17. № 5. 68NZN525. 26 с.
7. Окаме Нгонди Л.Ж., Телков В.П. Исследование влияния количества трещин и других операционных параметров на показатели разработки месторождения при проведении гидроразрыва пласта на горизонтальных скважинах // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2025. № 8 (404). С. 35-42.

References:

1. Nikonorova A.N., Voron K.A., Kremenetsky M.I., Borisov V.V., Bakhmutov A.V., Voronin D.A., Lazutkin D.M. Evaluation of the dynamics of production capabilities of oil and gas horizontal wells with multistage hydraulic fracturing based on the results of hydrodynamic studies based on the diagnostics of early flow regimes // Oil Gas Exposure. 2024. No. 6. pp. 50-56.
2. Sultanov Sh.Kh., Mukhametshin V.Sh., Stabinskas A.P., Veliev E.F., Churakov A.V. Study of the possibility of using water with high mineralization for hydraulic fracturing // Notes of the Mining Institute. 2024. Vol. 270. pp. 950-962.

3. Sadykov A.M., Khaziev A.M., Sypchenko S.E., et al. Method of fracture initiation and development for high-flow hydraulic fracturing in oil source reservoirs // *Expoz. Oil Gas*. 2023. No. 7. pp. 96-101.
4. Tang H., Ruan Q., Zhang L., Hu D., Qin J., Zhao Y., Ye Y. Intelligent optimization of fracturing stage and cluster parameters for tight oil reservoir // *Petroleum*. 2025. Vol. 11, Iss. 1. pp. 56-70.
5. Xu J., et al. Fracture Simulation and Parameter Optimization of Hydraulic Fracturing in Shale Oil Reservoir // *Thermal Science*. 2025. Vol. 29, No. 2B. P. 1557-1562.
6. Savenok O.V., Chuykova E.P. Justification of hydraulic fracturing at the final stage of oil field development // *Bulletin of Eurasian Science*. 2025. Vol. 17. No. 5. 68NZVN525. 26 p.
7. Okame Ngondi L.Zh., Telkov V.P. Study of the influence of the number of fractures and other operational parameters on field development indicators during hydraulic fracturing in horizontal wells // *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2025. No. 8 (404). P. 35-42.