



«ЗОЛОТОЙ КЛЮЧ» К РАЗРАБОТКЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ — ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ГЕОЛОГО–ИНЖЕНЕРНЫЙ ДИЗАЙН ГРП FRSMART

ФУ ЮНЦЯН¹, ЯН ЛИФЭН^{1,2}, ВАН СИНЬ¹, ЛЮ ЧЖЭ¹, ФАНЬ МЭН¹, ВАН ГАН¹, ЮАНЬ ЛИШАНЬ¹, ЛЮ ХАО¹,
У СИНЬ¹, ХУ ШИМЭН²

¹ Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC)
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

² Китайский нефтяной университет
18, ул. Фусюе, район Чанпин, г. Пекин 102200, Китай

АННОТАЦИЯ

Введение. В области разработки нетрадиционных углеводородов сильная неоднородность низкопроницаемых коллекторов, уровень проницаемости на уровне 1—100 нанодарси и нелинейные режимы фильтрации приводят к отсутствию естественной продуктивности, что делает гидравлический разрыв пласта (ГРП) единственным экономически оправданным методом разработки.

Цель. Для решения этой проблемы Китайская национальная нефтяная корпорация (CNPC) на основе 20-летних исследований разработала собственное решение FrSmart 2.0, обеспечивающее геолого-инженерную оптимизацию на протяжении всего технологического процесса гидроразрыва пласта (ГРП).

Материалы и методы. Программный комплекс функционирует через девять взаимосвязанных модулей:

модуль геомеханического моделирования: строит 1D—3D-модели на основе данных ГИС и промысловых данных ГРП;

модуль моделирования искусственных трещин: реализует технологию моделирования неплоских 3D-трещин, поддерживая сложные сценарии (многоканальный ГРП горизонтальных скважин и др.);

модуль прогнозирования дебитов УВС после ГРП: интегрирует технологию встроенного дискретного моделирования трещин (EDFM) для точного прогноза продуктивности и оптимизации технологических режимов разработки;

модуль оперативного управления: динамически анализирует стимулированный объем породы (SRV) и морфологию трещин по данным микросейсмике;

модуль предварительного проектирования: применяет методы энтропийных весов и кластеризации для оптимизации интервалов продуктивности (“sweet spots”) и расположения кластеров;

модуль анализа риска обсадных колонн: оценивает устойчивость разломов по критерию Мора — Кулона;

модуль экономической оценки: предлагает модели расчета затрат (под ключ и детализированную);

модуль тестового ГРП: определяет давление смыкания и эффективность закачки жидкости;

модуль базы данных: управляет основными параметрами.

Заключение. Ключевые модели FrSmart 2.0 отличаются от зарубежных аналогов менее чем на 5%, поддерживают GPU-ускорение. Решение развернуто на более чем 2000 рабочих мест в Китае, охватывая 90% нефтегазовых компаний и вузов, оптимизировав свыше 18 200 интервалов/стадий при удовлетворенности пользователей 96%. Его комплексный подход, высокоэффективные алгоритмы и широкая применимость делают FrSmart ключевым инструментом в Китае для интенсификации низкопроницаемых нетрадиционных коллекторов, значительно повышающим эффективность разработки.

Фу Юнцян, Ян Лифэн, Ван Синь, Лю Чжэ, Фань Мэн, Ван Ган, Юань Лишань, Лю Хао, У Синь, Ху Шимэн
«Золотой ключ» к разработке нетрадиционных низкопроницаемых коллекторов углеводородов...

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, ГРП, геомеханическое моделирование, моделирование ГРП, низкопроницаемые коллекторы, трудноизвлекаемые запасы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование профинансировано Научно-исследовательским институтом разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).

Для цитирования: Фу Юнцян, Ян Лифэн, Ван Синь, Лю Чжэ, Фань Мэн, Ван Ган, Юань Лишань, Лю Хао, У Синь, Ху Шимэн. «Золотой ключ» к разработке нетрадиционных низкопроницаемых коллекторов углеводородов — оптимизированный геолого-инженерный дизайн ГРП FrSmart. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2025;67(3):60—73.

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-3-60-73> EDN: ICCIIA

Статья поступила в редакцию 14.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

Опубликована 30.09.2025

“GOLDEN KEY” TO DEVELOPMENT OF UNCONVENTIONAL LOW-PERMEABILITY RESERVOIRS: FRSMART GEO-ENGINEERING INTEGRATED FRACTURING DESIGN SOFTWARE

FU YONGQIANG¹, YANG LIFENG^{1,2}, WANG XIN¹, LIU ZHE¹, FAN MENG¹, WANG GANG¹, YUAN LISHAN¹,
LIU HAO¹, WU XI¹, HU SHIMENG²

¹ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development (RIPED, CNPC)
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

² China University of Petroleum
18 Xuefulu, Changping District, Beijing 102200, China

ABSTRACT

Background. The strong heterogeneity, nanodarcy-scale permeability (1—100 nD), and nonlinear flow characteristics of unconventional low-permeability reservoirs result in negligible natural productivity, making hydraulic fracturing the only economically viable development method.

Aim. To address this challenge, the China National Petroleum Corporation (CNPC) has developed the proprietary FrSmart 2.0 solution based on 20 years of research, enabling geo-engineering optimization throughout the fracturing workflow.

Materials and methods. The software integrates nine synergistic modules, including the following. (1) *Geomechanical Modeling* constructs 1D—3D models using well-log and field data via finite-element algorithms. (2) *Artificial Fracture Simulation* employs non-planar 3D fracture modeling for complex scenarios (e.g., multi-cluster staged fracturing in horizontal wells). (3) *Post-Fracturing Production Prediction* leverages Embedded Discrete Fracture Modeling (EDFM) for accurate productivity forecasting and development optimization. (4) *Real-Time Decision-Making* dynamically analyzes stimulated rock volume (SRV) and fracture morphology using microseismic data. (5) *Pre-Fracturing Design* optimizes “sweet spot” intervals and cluster placement via entropy weighting and clustering algorithms. (6) *Casing Deformation Risk Analysis* evaluates fault stability using Mohr-Coulomb failure criteria. (7) *Economic Evaluation* offers lump-sum and itemized cost models. (8) The *Diagnostic Fracturing Tests* module determines closure pressure and fluid efficiency. (9) *Database Management* centralizes proppant, fluid, tubular, and rock mechanics parameters.

Conclusion. FrSmart 2.0 enables less than 5% deviation from international benchmarks and supports GPU acceleration. This software has been deployed at over 2000 workstations across 90% of Chinese oil and gas companies and universities. It has allowed optimization of over 18,200 stages/

intervals with 96% user satisfaction. Its integrated design, high-performance algorithms, and adaptability render FrSmart as a critical domestic solution for enhancing recovery in unconventional low-permeability reservoirs.

Keywords: hydraulic fracturing, geo-engineering integration, fracture simulation, low-permeability reservoirs, unconventional resources

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: this research was funded by PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development (RIPED, CNPC).

For citation: Fu Yongqiang, Yang Lifeng, Wang Xin, Liu Zhe, Fan Meng, Wang Gang, Yuan Lishan, Liu Hao, Wu Xi, Hu Shimeng. “Golden key” to development of unconventional low-permeability reservoirs: FrSmart geo-engineering integrated fracturing design software. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2025;67(3):60—73. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-3-60-73> EDN: ICCIHA

Manuscript received 14 August 2025

Accepted 25 August 2025

Published 30 September 2025

Предпосылки разработки решения FrSmart

В условиях глобальной энергетической трансформации разработка нетрадиционных углеводородных ресурсов стала ключевой стратегией обеспечения энергетической безопасности. Северная Америка благодаря технологии ГРП горизонтальных скважин возглавила революцию в добыче нетрадиционных углеводородов. Китай после почти 20 лет самостоятельных разработок также достиг рентабельной разработки низкопроницаемых и сильно неоднородных коллекторов. Для таких коллекторов характерна проницаемость в интервале 1—100 нанодарси и нелинейные режимы фильтрации, что обуславливает крайне низкую естественную продуктивность и делает ГРП единственным экономически целесообразным методом интенсификации притока в скважинах. Однако затраты на ГРП горизонтальных скважин исчисляются десятками миллионов юаней, и несоответствие создаваемой трещинной системы характеристикам пласта напрямую ведет к неудаче разработки. Следовательно, геолого-инженерная интеграция становится «золотым ключом» к решению проблемы создания сложных трещинных сетей и должна применяться на всех этапах жизненного цикла: проектировании, проведении работ и оценке результатов.

На основе 20-летнего технологического опыта CNPC было создано решение FrSmart 2.0 — интеллектуальная платформа для оптимизации дизайна ГРП, объединяющая геомеханическое моде-

лирование, динамическое моделирование трещин и оперативное управление, предоставляющая комплексное решение для рентабельной разработки сверхнизкопроницаемых и нетрадиционных коллекторов.

Технические характеристики FrSmart

FrSmart 2.0 применима для различных сценариев: однократный ГРП вертикальных/наклонно-направленных скважин, отдельный/совместный ГРП по пластам, многокластерный ГРП горизонтальных скважин, одновременный («зипперный») ГРП куста скважин. Доступны китайская и английская версии.

Платформа включает девять функциональных модулей: геомеханическое моделирование, моделирование искусственных трещин, предпроектный анализ, прогнозирование дебитов УВС после ГРП, анализ тестового ГРП, экономическая оценка, база данных, оперативное управление и анализ риска деформации обсадных колонн.

Модуль геомеханического моделирования (рис. 3). На основе данных ГИС, геостатистических алгоритмов и метода конечных элементов (МКЭ) реализует функции 1D/3D геомеханического моделирования и 4D-моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива, формируя геомеханическую модель для последующего моделирования трещин и продуктивности [3, 4, 6, 15].

Геологическое структурное моделирование: Импорт данных (границы пластов, разломы,

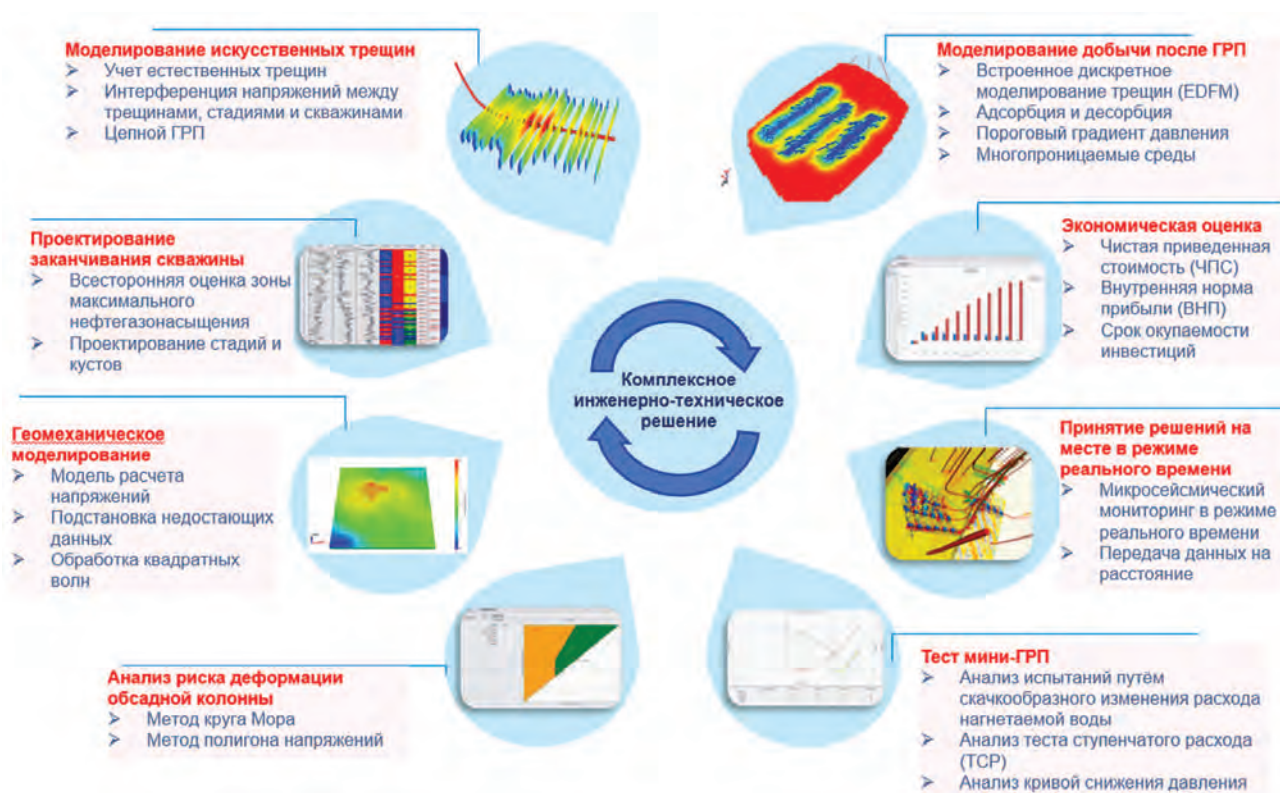


Рис. 1. Процесс геолого-инженерной оптимизации дизайна ГРП

Fig. 1. The process of geological and engineering optimization of hydraulic fracturing design

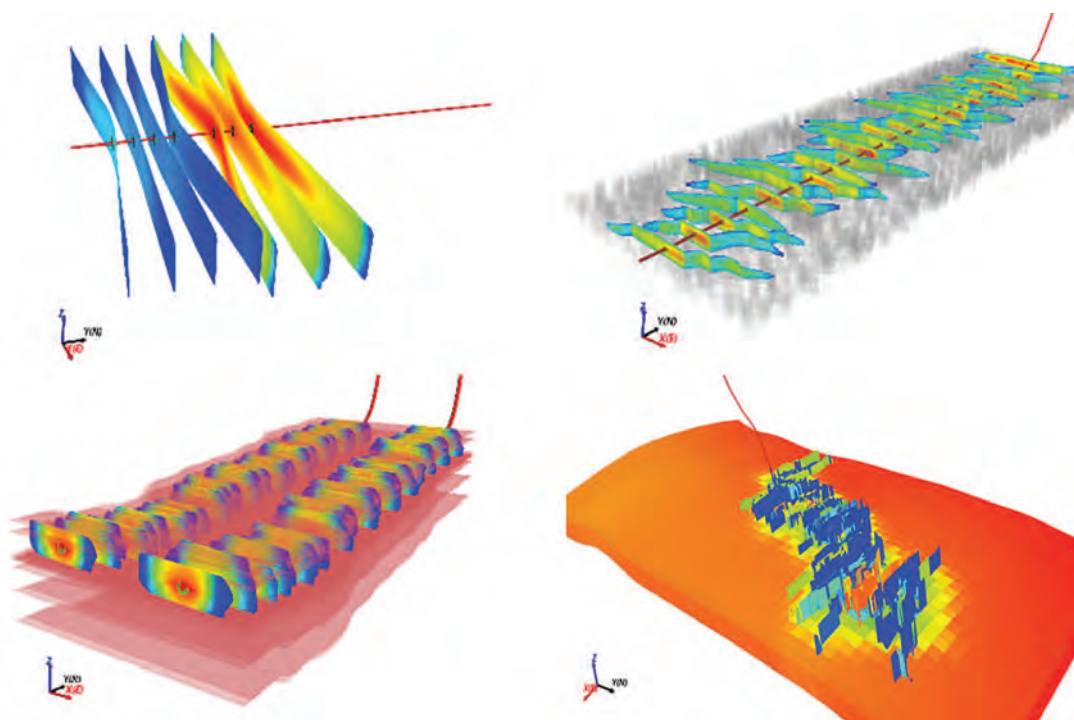


Рис. 2. Результаты моделирования трещин и продуктивности

Fig. 2. Results of fracture and productivity modeling

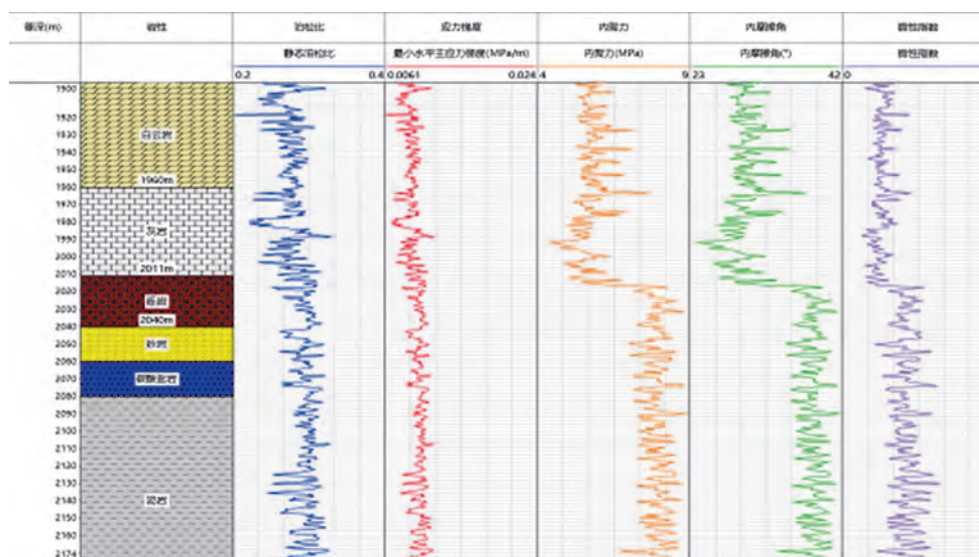


Рис. 3. Результаты геомеханического моделирования
Fig. 3. Results of geomechanical modeling

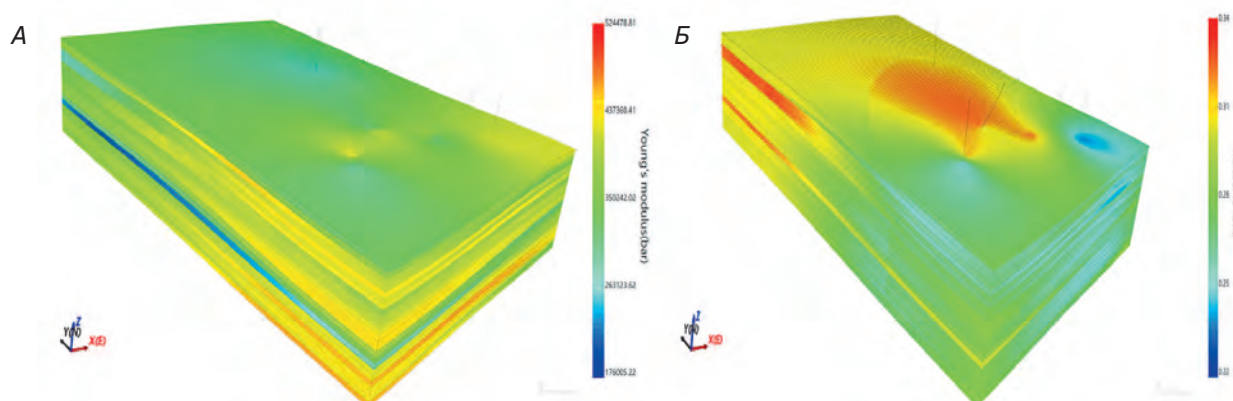


Рис. 4. 3D-распределение: А — модуля Юнга; Б — коэффициента Пуассона
Fig. 4. 3D distribution: A —Young's Modulus; Б — Poisson's Ratio

трещины, контуры, толщины пропластков). Построение структурной модели с использованием угловых (корнер-пойнт) сеток с детализацией до метрового масштаба.

Геологическое моделирование свойств: На основе структурной сетки реализуется упрощение (апскейлинг) и интерполяция данных ГИС для построения 3D-модели свойств (рис. 4). FrSmart интегрирует 1 алгоритм апскейлинга и 3 метода интерполяции для детерминированного и стохастического моделирования петрофизических и механических свойств.

Собственно геомеханическое моделирование: Импорт пользовательских сеток и моделей свойств, поддержка импорта сеток и моделей из Petrel. Использование метода граничных

элементов (МГЭ) для расчета максимального, минимального и вертикального главных напряжений и их направлений (рис. 5). Эквивалентное моделирование геомеханических свойств разломов и естественных трещин. Поддержка 5 типов граничных условий и 3 алгоритма решения. Для повышения скорости реализовано распараллеливание вычислений на CPU (ускорение >3х по сравнению с однопоточным режимом).

Модуль моделирования искусственных трещин. Для обеспечения точности и скорости моделирования, отвечающей инженерным требованиям, используется комбинация метода граничных элементов (МГЭ) и метода контрольных объемов (МКО) [11, 12, 14]. Реализованы функции моделирования неплоских 3D-трещин и сложных

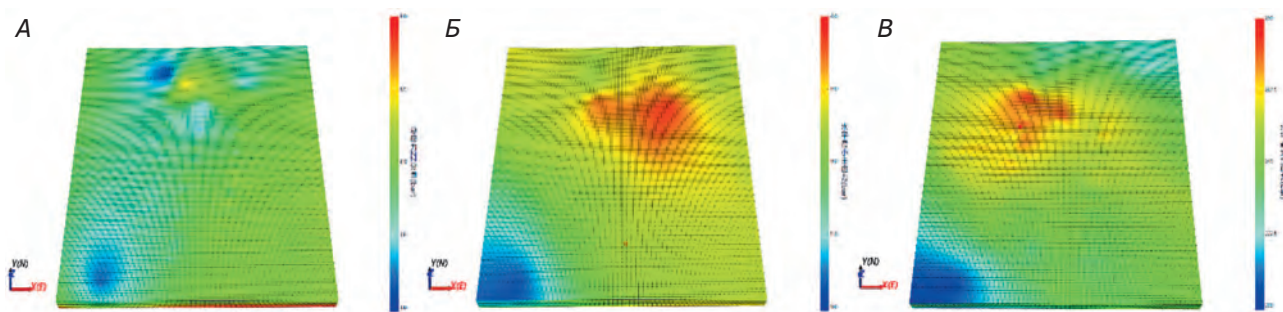


Рис. 5. Главное напряжение: А — вертикальное; Б — минимальное горизонтальное; В — максимальное горизонтальное

Fig. 5. Principal stress: A — vertical; Б — minimum horizontal; В — maximum horizontal

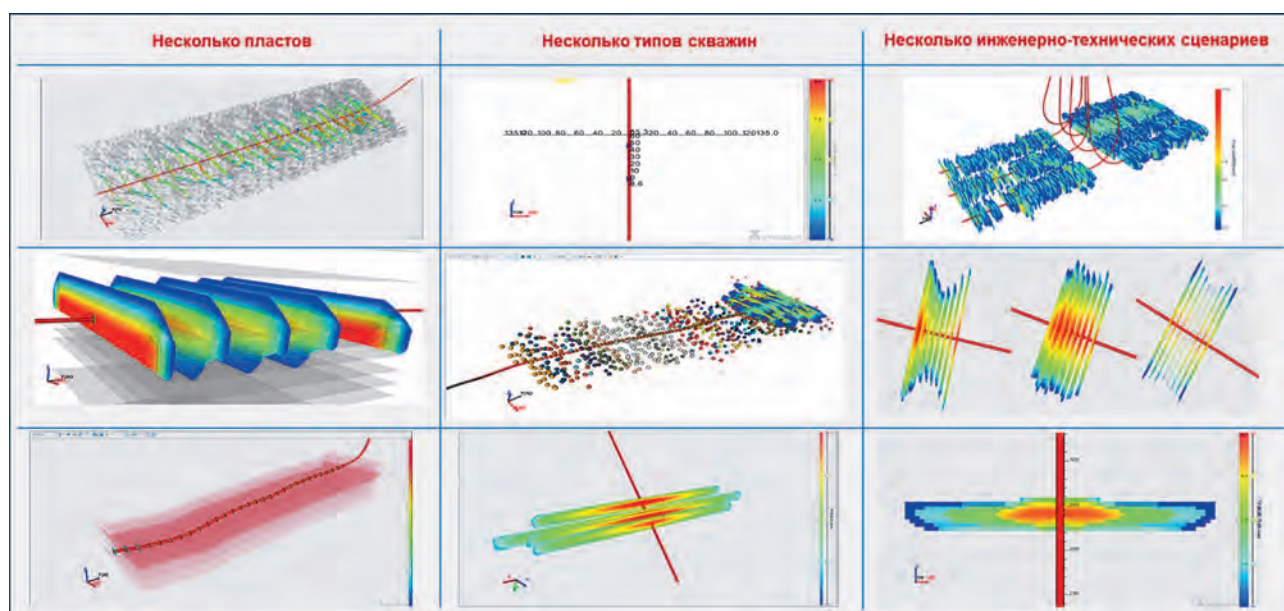


Рис. 6. Результаты 3D-моделирования искусственных трещин

Fig. 6. Results of 3D modeling of artificial cracks

искусственных трещин с учетом влияния естественных трещин. Модуль способен моделировать различные геологические особенности: наклонные пласты (рис. 6, нижний левый), пласты с развитой слоистостью (рис. 6, средний левый), пласты с естественными трещинами (рис. 6, верхний левый); различные типы скважин: вертикальные (рис. 6, верхний центр), горизонтальные (рис. 6, центр), наклонно-направленные (рис. 6, нижний центр); и инженерные сценарии: одновременный («зипперный») ГРП (рис. 6, верхний правый), ГРП с временным баллонным изолированием (рис. 6, средний правый), комбинированный ГРП с жидкостями разной вязкости (рис. 6, нижний правый). Модуль служит оптимизационным «движком» для параметров ГРП (объем, расход и т.д.).

Модуль прогнозирования дебитов УВС после ГРП. Преодолены ключевые технологические барьеры, включая моделирование со встроенными дискретными трещинами [13] (EDFM, рис. 7, верхний/нижний левый) и моделирование в многоконтинуальных средах. Разработан модуль прогноза продуктивности после ГРП, учитывающий:

- параметры искусственных трещин (длина, проницаемость; высокоскоростная нелинейная (не-Дарси) фильтрация флюидов внутри трещин; долгосрочное влияние проппанта на проводимость трещин);
- специфические механизмы фильтрации в нетрадиционных коллекторах: сорбция/десорбция газа (сланцевый газ, метан угольных пластов; типичные результаты на рис. 7, верхний центр);

градиент сдвига (начальное) давление [5] (низкопроницаемые и плотные пласты нефтяных залежей; типичные результаты на рисунке 7, нижний центр); напряженно-зависимые пористость и проницаемость. Модуль обладает уникальными функциями: моделирование энергонасыщающего ГРП (учет влияния закачки больших объемов жидкости на распределение давления и насыщенности; типичные результаты на рисунке 7, верхний правый); автоматическая калибровка истории (методы симплекса и ансамблевого фильтра Калмана (EnKF); пример на рисунке 7, нижний правый).

Модуль анализа тестового ГРП. Интерпретация данных мини-ГРП для определения давления смыкания, эффективности жидкости, потерь на трение и т.д. (рис. 8) [9].

Модуль оперативного управления. Обеспечивает онлайн/офлайн-импорт данных микросейсморазведки (рис. 9) и параметров закачки (рис. 10). Разработаны функции: расчет стимулированного объема породы (SRV) на основе микросейсмических

событий [2, 7]; аппроксимация поверхностей трещин в дискретной трещинной сети (DFN); динамическая визуализация («скульптурирование») трещин. Это позволяет динамически идентифицировать и анализировать искусственные трещины для оперативной оптимизации и корректировки программы ГРП на месте.

Модуль базы данных. Обеспечивает хранение данных о проппантах, жидкостях ГРП, обсадных колоннах и НКТ, механических свойствах пород, файлов, предоставляя основные параметры для работы ПО ГРП.

Модуль предварительного проектирования. Применяет пороговые методы, кластеризацию, метод энтропийных весов и др. [1] для оценки интервалов продуктивности («sweet spots»). С учетом зон исключения («avoidance zones») автоматически или вручную рекомендует расположение стадий и кластеров ГРП (рис. 11).

Модуль анализа риска деформации обсадных колонн. Предоставляет методы

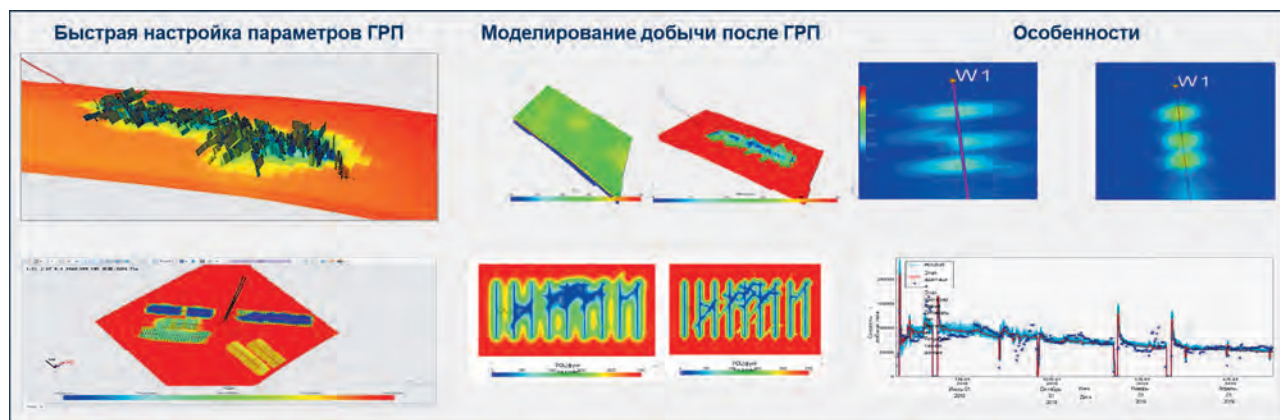


Рис. 7. Примеры результатов прогнозирования дебитов после ГРП
Fig. 7. Examples of flow rate forecasting results after hydraulic fracturing

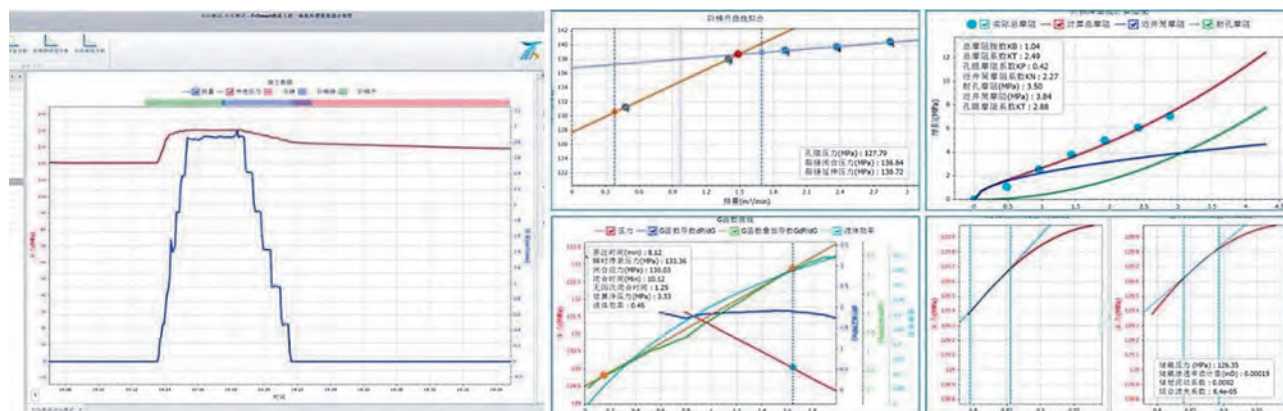


Рис. 8. Кривые мини-ГРП и результаты анализа
Fig. 8. Mini-frac curves and analysis results

Фу Юнцян, Ян Лифэн, Ван Синь, Лю Чжэ, Фань Мэн, Ван Ган, Юань Лишань, Лю Хао, У Синь, Ху Шимэн
«Золотой ключ» к разработке нетрадиционных низкопроницаемых коллекторов углеводородов...

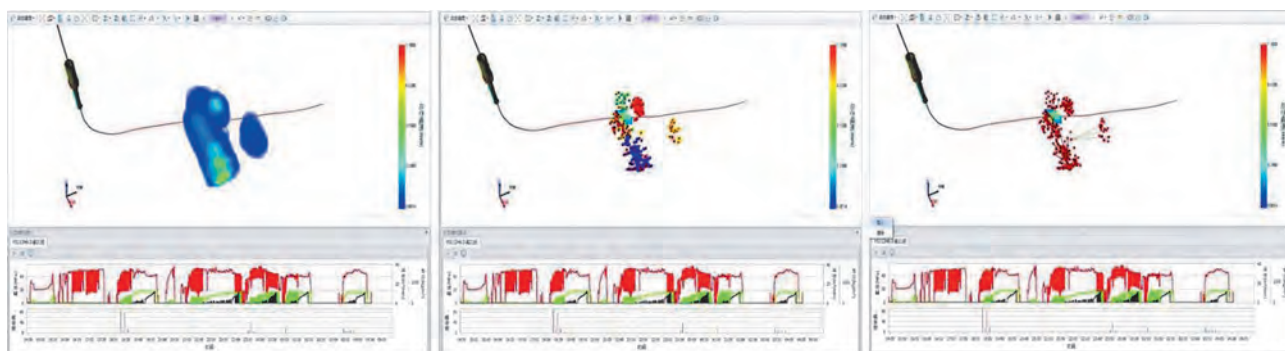


Рис. 9. Результаты микросейсмической интерпретации в модуле оперативного управления (SRV, аппроксимация поверхности DFN, динамическая визуализация трещин)

Fig. 9. Microseismic interpretation results in the operational management module (SRV, DFN surface approximation, dynamic fracture visualization)

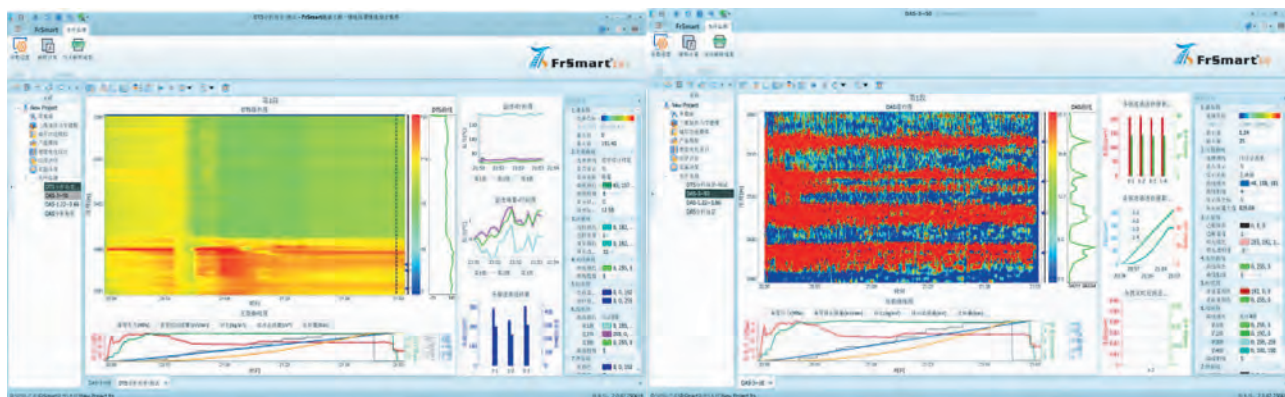


Рис. 10. Результаты интерпретации оптоволоконных данных (DTS/DAS) в модуле оперативного управления

Fig. 10. Results of fiber optic data interpretation (DTS/DAS) in the operational control module

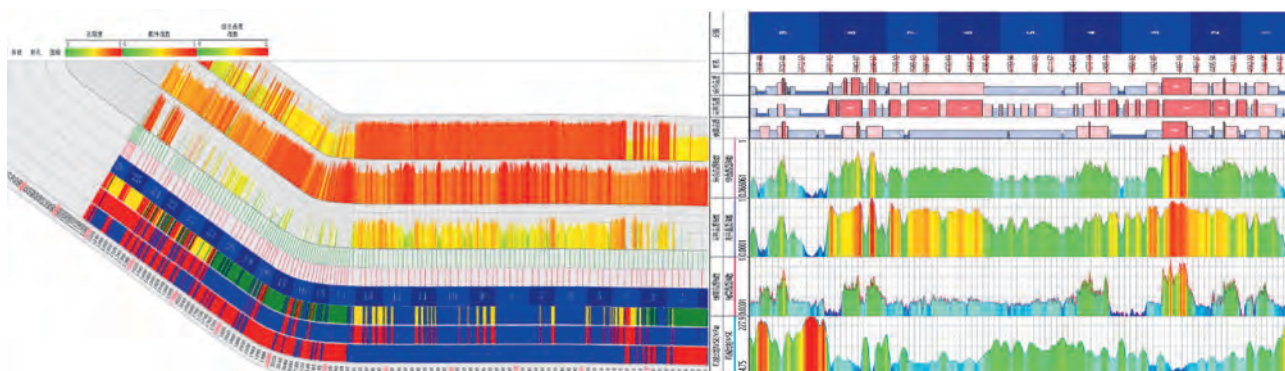


Рис. 11. Оценка интервалов продуктивности («sweet spots») и проектирование расположения стадий/кластеров ГРП в горизонтальной скважине

Figure 11. Evaluation of productivity intervals ("sweet spots") and design of the location of hydraulic fracturing stages/clusters in a horizontal well

оценки устойчивости разломов (критерий разрушения Мора — Кулона, полигоны напряжений) (рис. 12) [8, 10].

Модуль экономической оценки (рис. 13). Использует две схемы расчета доходности: модель

подряда под ключ (lump sum) и модель детализированного постатейного расчета затрат (itemized cost).

Девять модулей могут работать как независимо, так и интегрированно с «однокнопочной»

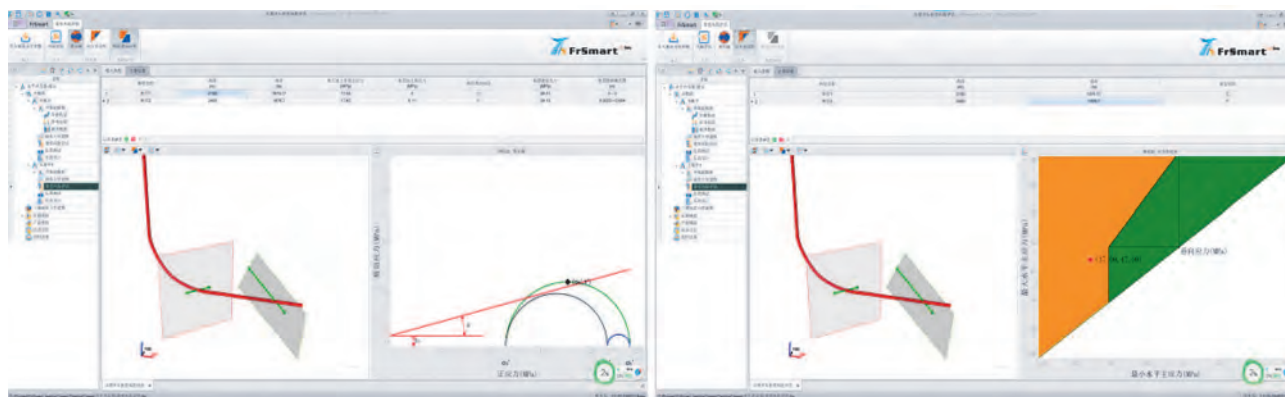


Рис. 12. Оценка точек риска деформации колонны методами критерия Мора-Кулона и полигонов напряжений
Fig. 12. Evaluation of risk points of column deformation using the Mohr-Coulomb criterion and stress polygon methods

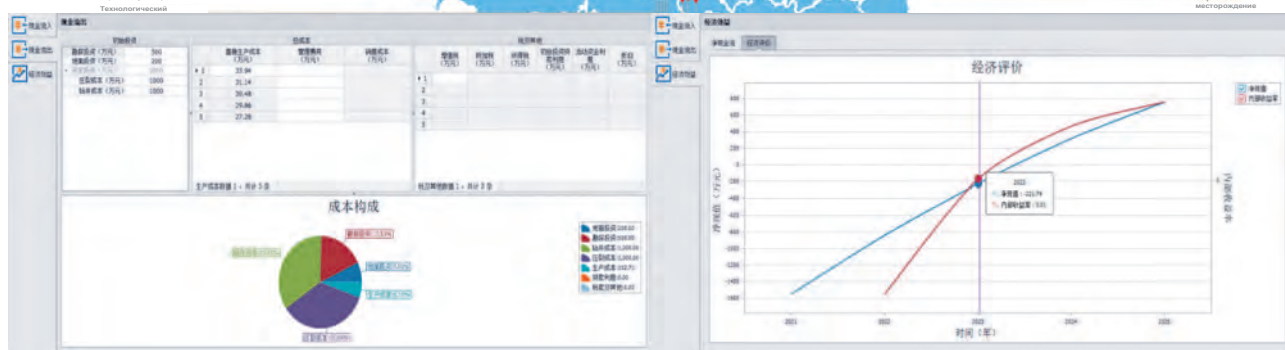


Рис. 13. Результаты работы модуля экономической оценки
Fig. 13. Results of the economic assessment module

передачей результатов без потери данных. Ключевые модели имеют отличие от зарубежных аналогов <5%. Скорости геомеханического моделирования и моделирования дебитов УВС после ГРП сопоставимы. Платформа обладает уникальными функциями: моделирование энергонасыщающего ГРП, баллонного изолирования, GPU-ускорение моделирования трещин.

Внедрение FrSmart. Практические примеры применения

На текущий момент FrSmart внедрен более чем на 2000 рабочих станциях в китайских нефтегазовых компаниях (рис. 14), охватывая свыше 90% пользователей в Китае (CNPC, Sinopec, CNOOC и более 10 университетов). Накопленный опыт применения превышает 18 200 интервалов/стадий ГРП с высокими практическими результатами и удовлетворенностью заказчиков на уровне 96%. FrSmart стал ключевым технологическим инструментом для интенсификации добычи из низкопроницаемых и нетрадиционных коллекторов в Китае.

Типовой пример применения в сланцевом газе — оптимизация для достижения высокой продуктивности

В проекте с тремя скважинами, ориентированном на максимизацию дебита, использовалась не плоская 3D-модель трещин для симуляции одновременного («зипперного») ГРП. Оптимизация параметров (общий объем жидкости ~33 600 м³, общий объем проппанта 4180 т) позволила после реализации достичь суммарного дебита газа с трех скважин более 1 млн м³/сут. Это обеспечило полное покрытие коллектора искусственными трещинами и максимальную продуктивность (рис. 15, 16).

Скв. Н15-1: 16 стадий, 142 кластера; расстояние между кластерами 9,41 м; ср. длина трещины 321 м; ср. высота трещины 29 м; SRV 12,28 млн м³; прогнозируемые извлекаемые запасы за 20 лет (EUR) 75 млн м³.

Скв. Н15-2: 16 стадий, 147 кластеров; расстояние между кластерами 8,84 м; ср. длина трещины 308 м; ср. высота трещины 30 м; SRV 12,01 млн м³; EUR (20 лет) 72 млн м³.



Рис. 14. Распространение FrSmart в Китае
 Fig. 14. FrSmart distribution in China

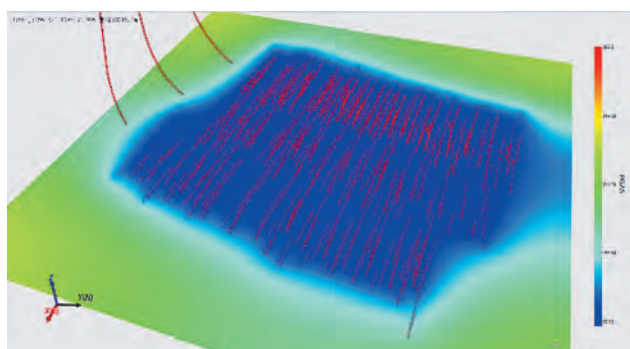


Рис. 15. Распределение прогнозируемой продуктивности после ГРП — достигнут полный охват запасов
 Fig. 15. Distribution of predicted productivity after hydraulic fracturing — full coverage of reserves achieved

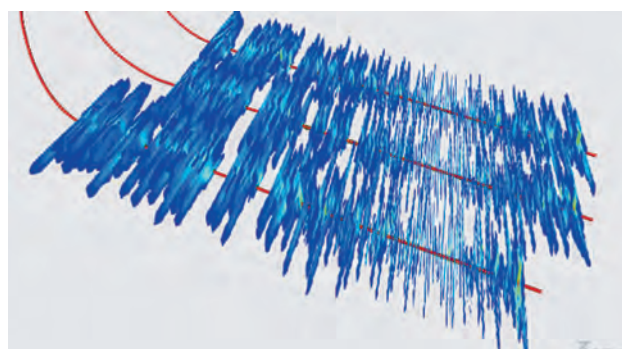


Рис. 16. Результаты моделирования искусственных трещин после ГРП — искусственные трещины покрыли всю область коллектора
 Fig. 16. Results of modeling artificial fractures after hydraulic fracturing — artificial fractures covered the entire reservoir area

Скв. Н15-3: 16 стадий, 130 кластеров; расстояние между кластерами 10,2 м; ср. длина трещины 323 м; ср. высота трещины 29 м; SRV 11,81 млн м³; EUR (20 лет) 69 млн м³.

Типовой пример применения в сланцевом газе — оптимизация для увеличения продуктивности и предотвращения перетоков (Frac Hit)

Для кустовой площадки WH80: после ввода в эксплуатацию скв. 80-4 образовалась зона пони-

женного давления. При проектировании ГРП скв. 80-5 и 80-6 возникло противоречие между риском «перетока» (frac hit) в скв. 80-4 и необходимостью полного охвата запасов. С помощью FrSmart проведена дифференцированная оптимизация.

Скв. 80-5: В интервалах, противопоставленных эффективно простимулированным зонам скв. 80-4 (расстояние между скважинами 500 м), для предотвращения перетока использовано 8 кластеров с полудлиной трещины

220 м и удельным расходом жидкости 28—29 м³/м. В интервалах, противопоставленных недостаточно простимулированным зонам скв. 80-4 (стадии 8—9, 14—15), использовано 6 кластеров с полудлиной трещины 235 м и удельным расходом жидкости 29—30 м³/м.

Скв. 80-6: Учитывая расстояние 450 м между скважинами и необходимость полного межскважинного охвата, в основных интервалах использовано 8 кластеров с удельным расходом жидкости 30—31 м³/м.

Результат: Мониторинг давления на скв. 80-4 во время ГРП скв. 80-5 не показал значительного роста давления. Достигнута двойная цель: предотвращение межскважинных перетоков и создание эффективной трещинной системы для увеличения добычи (рис. 17, 18).

Пример оптимизации ГРП для метана угольных пластов (СВМ) — достижение прорыва в продуктивности

На основе модели естественной трещиноватости с использованием модуля моделирования сложных искусственных трещин спрогнозировано, что при объеме жидкости на стадию 2200—2800 м³

и объеме проппанта 300—450 м³ основная трещина в скв. m2H достигнет длины 81—281 м (средняя — 191 м). Модуль прогноза продуктивности позволил смоделировать динамику изменения поля давления и степень десорбции газа: через 3 года эксплуатации степень десорбции в зоне охвата трещинами составила 10—30% (рис. 19).

Реализация: На скв. m2H проведен 15-стадийный ГРП (46 кластеров), общий объем жидкости 38 897 м³, общий объем проппанта 6100 м³.

Результат: Прогнозируемый стабильный дебит 60 тыс. м³/сут достигнут и поддерживался 495 дней. Прогнозируемые извлекаемые запасы за 15 лет (EUR) составили 69,1 млн м³. Фактический дебит после испытаний — 60—100 тыс. м³/сут стабильно соответствовал прогнозу. Достигнут прорыв в продуктивности для данного актива.

Пример применения при проектировании ГРП сланцевой нефти — достижение сбалансированного охвата и прорыва в продуктивности

Скважины НУ-1, НУ-2, НУ-3 — оценочные скважины в блоке сланцевой нефти месторождения Ляохэ (Китай). Для обеспечения

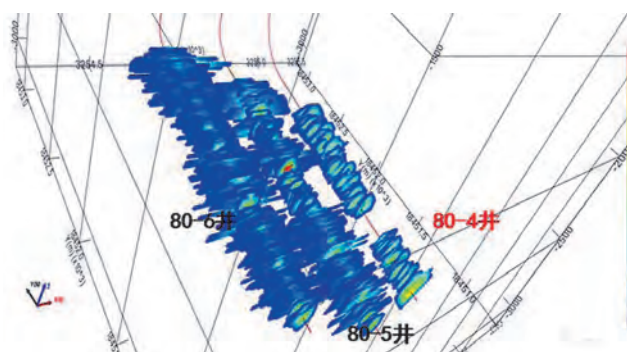


Рис. 17. Результаты моделирования искусственных трещин

Fig. 17. Artificial fracture modeling results

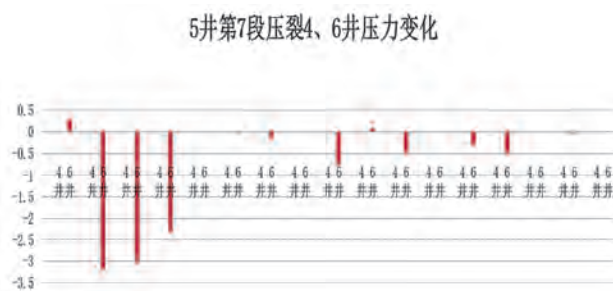


Рис. 18. Данные мониторинга давления в процессе ГРП

Fig. 18. Pressure monitoring data during hydraulic fracturing

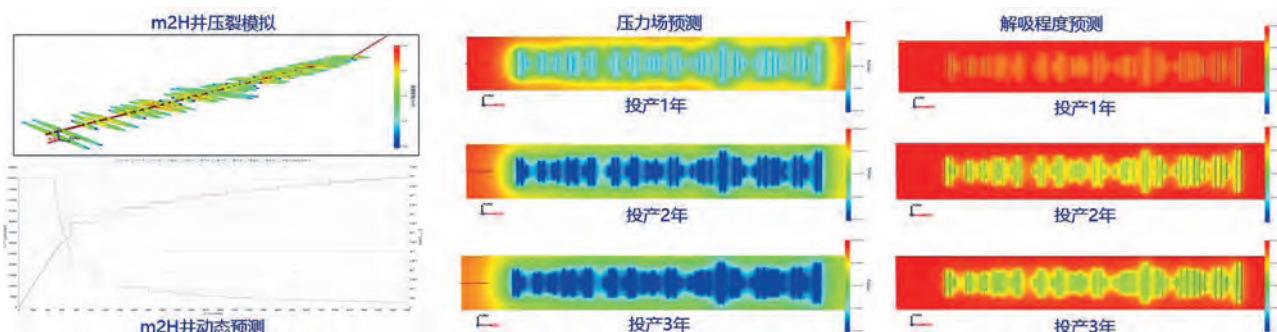


Рис. 19. Результаты прогноза трещин и продуктивности скв. m2H

Fig. 19. Results of fracture and well productivity forecast m2H

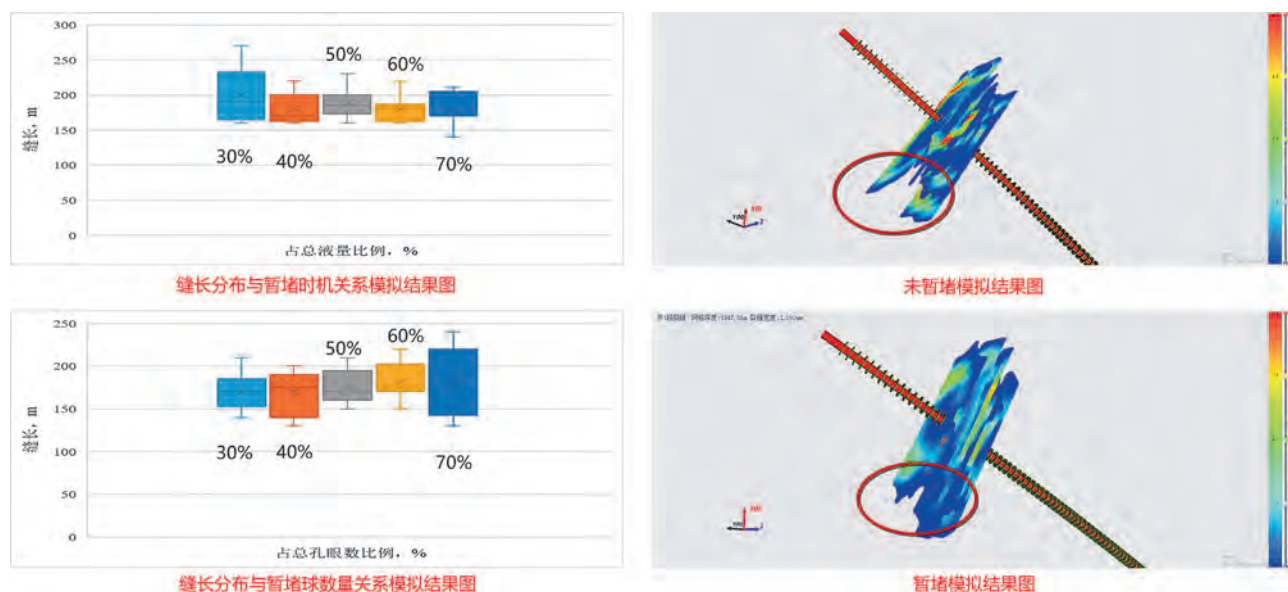


Рис. 20. Пример моделирования ГРП с временным изолированием (стадия 3, скв. НУ-2)

Fig. 20. Example of modeling hydraulic fracturing with temporary isolation (Stage 3, well HY-2)

сбалансированного распространения трещин и максимального охвата межскважинных запасов модуль моделирования трещин FrSmart использовался для проектирования ГРП трех скважин. Оптимизированы ключевые параметры: расстояние между трещинами, полудлина трещины, проводимость трещины (CF), технология проведения, время постановки временного изолирующего барьера (diverters), количество изолирующих шаров.

Оптимальные параметры: соотношение низко/высоковязкой жидкости 7:3, удельная масса пропанта 3,0—3,5 т/м, удельный расход жидкости 32 м³/м, объем жидкости на стадию 50—60%, количество изолирующих шаров ~60% от числа перфорационных отверстий.

Результат: после реализации дебит сектора разработки превысил дебит соседних секторов более чем на 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Chen F.L., Tong M., Yan L., et al. Sweetness Evaluation Method for Tight Oil "Sweet Spots". Special Oil & Gas Reservoirs. 2017;24(02), pp. 12—17 (In Chinese).
- Chen H.D. Research on Microseismic Monitoring Technology for Shale Gas Reservoir Stimulation. PhD Dissertation, China University of Geosciences (Beijing), 2022. (In Chinese). <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2022.000120>
- Chen M., Jin Y., Zhang G.Q. Fundamentals of Petroleum Engineering Rock Mechanics. Science Press, 2008. 85 p. (In Chinese).
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. Blackwell Publishing, 2007. 488 p.
- Li A.F., Liu M., Zhang H.Q., et al. Study on Variation of Starting Pressure Gradient for Oil-Water Two-Phase Flow in Low-Permeability Reservoirs. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition). 2010;25(06), pp. 47—50; 54; 111 p. (In Chinese).
- Li Z.M., Zhang J.Z. In-Situ Stress and Oil-Gas Exploration & Development. Petroleum Industry Press, 1997, pp. 138—140 (In Chinese).
- Maxwell S.C., Rutledge J., Jones R., et al. Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing. SEG Books, 2014. 212 p.
- Moos D., Peska P., Finkbeiner T., et al. Comprehensive Wellbore Stability Analysis Utilizing Quantitative Risk Assessment. SPE Drilling & Completion, vol. 38, 2003, pp. 97—109.
- Nolte K.G., Smith M.B. Fracture Pressure Analysis for Non-Ideal Behavior. Journal of Petroleum Technology (JPT). 1991;43(02), pp. 210—218. <https://doi.org/10.2118/20704-PA>
- Song G.C. Mechanism of Casing Damage in Complex Well Conditions of Horizontal Wells and Prevention Technology. PhD Dissertation, China University of Petroleum, 2010 (In Chinese).
- Wang Z., Yang L.F., Wang X., et al. Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing Based on Non-Planar 3D Fracture Model. In: Proceedings of the 32nd National Natural Gas Academic Annual Conference (2020). CNPC Key Laboratory of Reservoir Reconstruction;

- PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 2020, pp. 1025—1033 (In Chinese). <https://doi.org/10.26914/c.cn-kihy.2020.064973>
12. Weng X. Modeling of complex hydraulic fractures in naturally fractured formation. *Journal of unconventional oil and gas resources*. 2014, pp. 114—135. <https://doi.org/10.1016/j.juogr.2014.07.001>
13. Yu W. Embedded Discrete Fracture Model (EDFM) for Complex Fracture Geometry. [Publisher not identified], 2018, pp. 155—205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813868-7.00005-5>
14. Zhu H.Y., Song Y.J., Tang X.H. Research Advances in 4D Geostress Evolution and Complex Fracture Propagation in Shale Gas Reservoir Infill Wells. *Petroleum Science Bulletin*. 2021;6(03), pp. 396—416 (In Chinese).
15. Zoback M.D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 2010. 449 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Фу Юнцян — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ян Лифэн — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ван Синь — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Лю Чжэ — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Фань Мэн — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ван Ган — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Юань Лишань — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Лю Хао — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

У Синь — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ху Шимэн — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Fu Yongqiang — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Yang Lifeng — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Wang Xin — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Liu Zhe — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Fan Meng — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Wang Gang — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Yuan Lishan — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Liu Hao — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Wu Xi — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Hu Shimeng — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фу Юнцян — профессор, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Ян Лифэн — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC); аспирант, Китайский нефтяной университет.
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай
18, ул. Фусюе, район Чанпин, г. Пекин 102200, Китай

Ван Синь — профессор, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Лю Чжэ — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Фань Мэн — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Ван Ган — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Юань Лишань — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Лю Хао — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

У Синь — старший инженер, Научно-исследовательский институт разведки и разработки нефтяных месторождений Китая (RIPED, CNPC).
9, Северная улица Дунчжимэнь, район Дунчэн, г. Пекин 100007, Китай

Ху Шимэн — аспирант, Китайский нефтяной университет.
18, ул. Фусюе, район Чанпин, г. Пекин 102200, Китай

Fu Yongqiang — Professor, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Yang Lifeng — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC); PhD Candidate in Engineering, China University of Petroleum.
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China
18 Xuefulu, Changping District, Beijing 102200, China

Wang Xin — Professor, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Liu Zhe — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Fan Meng — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Wang Gang — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Yuan Lishan — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Liu Hao — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Wu Xi — Senior Engineer, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED, CNPC).
9 Dongzhimen North Str., Dongcheng District, Beijing 100007, China

Hu Shimeng — PhD Candidate, China University of Petroleum.
18 Xuefulu, Changping District, Beijing 102200, China