

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ
ТРЕЩИНЫ В КАРБОНАТНОМ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРОВОМ
КОЛЛЕКТОРЕ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СИСТЕМОЙ
ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРЕЩИН**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Октябрьский, Российская Федерация
Вафин Булат Рафисович, студент 2 курса магистратуры*

**MODELING OF HYDRAULIC FRACTURE PROPAGATION IN A
CARBONATE FRACTURED-POROUS RESERVOIR TAKING INTO
ACCOUNT INTERACTION WITH THE NATURAL FRACTURE SYSTEM**

*Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky, Russian Federation
Vafin Bulat Rafisovich, 2nd-year master's student*

Аннотация: В статье представлены результаты численного моделирования распространения гидравлической трещины (ГТ) в карбонатном коллекторе трещиновато-порового типа на примере турнейских отложений. С использованием когезионного метода (CZM) исследовано влияние угла подхода ГТ к естественной трещине (θ), режима закачки флюида и плотности трещин на итоговую сложность сети трещин. Установлено, что максимальная длина ГТ достигается при $\theta=0^\circ$, минимальная — при 90° . Режим закачки «высокая скорость $\rightarrow$ низкая скорость» увеличивает индекс сложности сети на 41 % по сравнению с равномерным. Для условий турнейского коллектора с плотностью трещин $\delta_{тр}=2,5 \text{ м}^{-1}$ рекомендована оптимизация угла стадий ГРП. Предложена формула для оценки эффективной длины ГТ с учетом экранирования напряжений.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, карбонатный коллектор, когезионный метод, естественные трещины, угол подхода, режим закачки, моделирование, турнейские отложения.

Abstract: The article presents the results of numerical modeling of hydraulic fracture propagation in a carbonate fractured-porous reservoir using the example of Tournaisian deposits. Using the cohesive zone method (CZM), the influence of the approach angle of the hydraulic fracture to the natural fracture (θ), fluid injection regime, and fracture density on the resulting fracture network complexity was investigated. It was found that the maximum hydraulic fracture length is achieved at $\theta = 0^\circ$, and the minimum at 90° . The injection regime "high rate $\rightarrow$ low rate" increases the network complexity index by 41% compared to a uniform

regime. For the conditions of the Tournaisian reservoir with a fracture density of $\delta_{fr} = 2.5 \text{ m}^{-1}$, optimization of the hydraulic fracturing stage angle is recommended. A formula is proposed for estimating the effective hydraulic fracture length taking into account stress shadowing.

Keywords: hydraulic fracturing, carbonate reservoir, cohesive zone method, natural fractures, approach angle, injection regime, modeling, Tournaisian deposits.

Эффективность ГРП в карбонатных трещиновато-поровых коллекторах определяется сложным взаимодействием между растущей гидравлической трещиной (ГТ) и системой естественных трещин (ЕТ) [1]. В турнейских отложениях густота трещин может достигать 5 м^{-1} , что создает высокую вероятность отклонения или остановки ГТ при неоптимальных параметрах закачки [2]. Цель работы — численное исследование влияния ключевых параметров на распространение ГТ и разработка рекомендаций для проектирования ГРП в аналогичных условиях.

1. Постановка задачи и метод моделирования

Рассматривается сектор пласта размером $20 \times 20 \text{ м}$ с одной естественной трещиной. Параметры модели соответствуют турнейскому коллектору: модуль Юнга $E = 25 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$, прочность на разрыв $\sigma_t = 5 \text{ МПа}$, проницаемость матрицы $k_m = 20 \text{ мД}$, трещинная проницаемость $k_f = 200 \text{ мД}$. Моделирование выполнено когезионным методом (CZM) с билинейным тракционным законом.

Исследовались:

- угол подхода ГТ к ЕТ: $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$;
- режимы закачки: равномерный ($Q = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$), режим А (высокая начальная $0,01 \rightarrow$ низкая $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$), режим В (низкая $0,001 \rightarrow$ высокая $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$);
- густота трещин $\delta_{тр} = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ м}^{-1}$.

2. Результаты моделирования

2.1. Влияние угла подхода

Зависимость относительной длины ГТ $L_{\text{отн}}$ и индекса сложности сети $I_{\text{сл}}$ от угла подхода представлена в табл. 3.

Таблица 1 – Влияние угла подхода

θ , град	$L_{\text{отн}}$, д.ед.	$I_{\text{сл}}$, д.ед.
0	1,00	1,00
30	0,85	1,12
45	0,72	1,18
60	0,55	1,24
90	0,38	1,35

Аппроксимация дает эмпирическую зависимость:

$$L_{\text{отн}}(\theta) = 1,02 - 0,0071 \cdot \theta - 0,00015 \cdot \theta^2 (R^2 = 0,992)$$

2.2. Влияние режима закачки

Режим А (высокая→низкая скорость) обеспечивает наибольший индекс сложности $I_{\text{сл}} = 1,41$, тогда как режим В снижает его до 0,72 (табл. 4).

Таблица 2 – Влияние режима закачки

Режим	$I_{\text{сл}}$	Фактор ветвления
Равномерный	1,00	1,00
А (High→Low)	1,41	1,56
В (Low→High)	0,72	0,61

2.3. Влияние густоты трещин

С увеличением $\delta_{тр}$ эффективная длина ГТ снижается, а сложность сети возрастает до определенного предела. Для турнейского коллектора (характерная $\delta_{тр}=2,5 \text{ м}^{-1}$) рекомендована длина стадии ГРП не более 80–100 м.

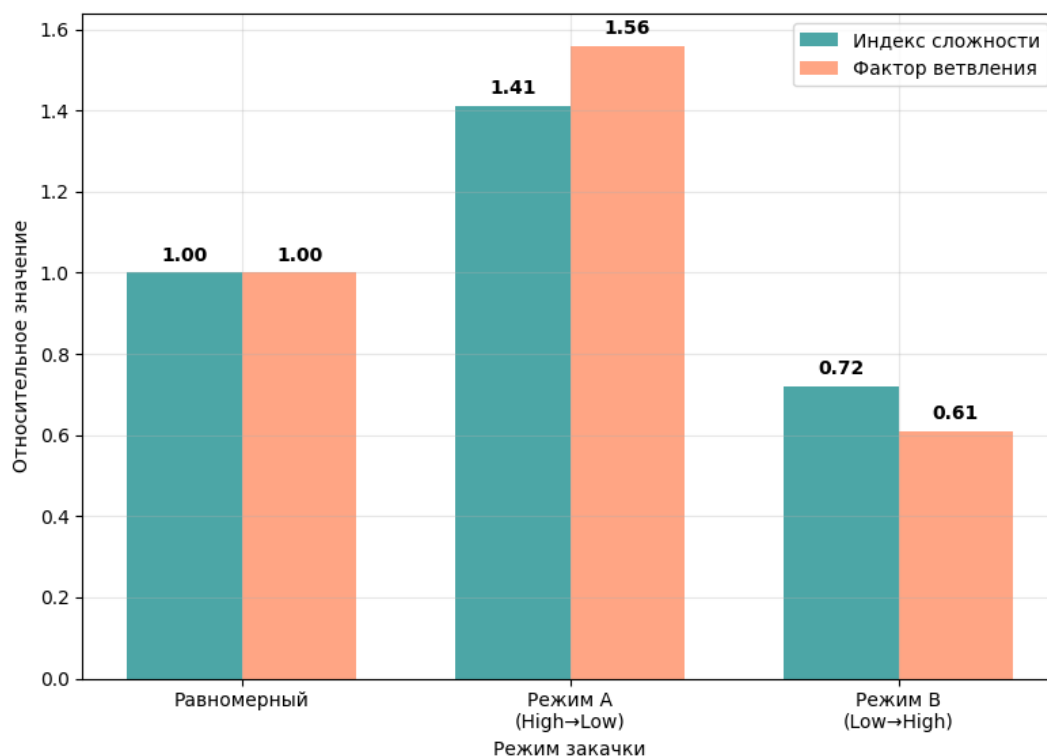


Рисунок 1 – Влияние режима закачки на эффективность ГРП

Для многостадийного ГРП в турнейских отложениях предложена формула для оценки эффективной длины трещины n -й стадии с учетом экранирования:

$$L_n = L_1 \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{n-1}{S}\right)$$

где:

L_1 — длина трещины первой стадии, м;

S — расстояние между стадиями, м;

k — коэффициент, зависящий от анизотропии напряжений ($k=0,15$ при $K_{ан}=0,6$, $k=0,35$ при $K_{ан}=0,9$).

Закключение

1. Наибольшая эффективность ГРП в трещиноватом карбонатном коллекторе достигается при ориентации ГТ параллельно направлению максимального главного напряжения ($\theta=0^\circ$).

2. Режим закачки «высокая скорость → низкая скорость» увеличивает индекс сложности сети на 41 %.
3. Для турнейских отложений с густотой трещин $\delta_{тр}=2,5 \text{ м}^{-1}$ рекомендована длина стадии ГРП 80–100 м.
4. Предложена эмпирическая формула для оценки экранирования при многостадийном ГРП.

Список использованных источников

1. Blanton, T.L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures / T.L. Blanton // SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Symposium. — 1982. — SPE-10847-MS. DOI: 10.2118/10847-MS
2. Хафизов, А.Р. Особенности разработки карбонатных коллекторов с трещиновато-поровым типом / А.Р. Хафизов, Ф.Г. Габдрахманов // Нефтяное хозяйство. — 2021. — № 8. — С. 42–47.
3. Wang, H. Cohesive zone method for hydraulic fracturing simulation: A review / H. Wang, Z. Liu, L. Huang // Engineering Fracture Mechanics. — 2020. — Vol. 235. — 107162. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107162
4. Gu, H. Hydraulic fracture crossing natural fracture at non-orthogonal angles / H. Gu, X. Weng, J.B. Lund // SPE Production & Operations. — 2012. — Vol. 27, No. 1. — P. 20–28. DOI: 10.2118/139984-PA
5. Roussel, N.P. Optimizing fracture spacing and sequencing in horizontal-well fracturing / N.P. Roussel, M.M. Sharma // SPE Production & Operations. — 2011. — Vol. 26, No. 2. — P. 173–184. DOI: 10.2118/127986-PA
6. Мищенко, И.Т. Технология и техника добычи нефти / И.Т. Мищенко. — М.: Нефть и газ, 2018. — 824 с.