

УДК 622.276.66

UDC 622.276.66

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**НОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ОПТИМИЗАЦИИ ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ
ГРП В НЕФТЕНОСНОМ ПЕСЧАНИКЕ НА
МЕСТОРОЖДЕНИИ ИРАНА****A NEW MATHEMATICAL MODEL FOR
OPTIMIZING FRACTURE LENGTH IN THE
IRANIAN OIL SAND RESERVOIR**

Масооми Реза

аспирант

e-mail: r.masoomi451@yahoo.com

*ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный
технологический университет», г. Краснодар,
Россия*

Masoomi Reza

postgraduate student

e-mail: r.masoomi451@yahoo.com

*FGBOI VPO Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russia*

Создание трещины при ГРП в физической структуре породы пласта является одним из важных способов повышения производительности нефтяных и газовых скважин. Эти искусственные каналы фильтрации способны повысить проницаемость породы коллектора для улучшения условий поступления углеводородов в ствол скважины. В исследовании был предложен новый подход для оптимизации длины трещины при операции гидравлического разрыва пласта. Кроме того, новый метод представляет собой сочетание различных геометрических моделей гидроразрыва для моделирования геометрии трещин при гидравлическом разрыве пласта. Авторы показали, что существует приемлемое соотношение между результатом псевдо 3D модели геометрии трещины и прогнозом результатов предлагаемого подхода

Creation of hydraulic fracturing in the physical structure of the reservoir rock is one important way to improve the productivity of oil and gas wells. These artificial channels increase ability of the reservoir rock for conducting hydrocarbons to the wellbore. In this study a new approach has been proposed for optimization of fracture half length in hydraulic fracturing operation. Also, this new method that is a combination of various fracturing geometry models has been proposed for modeling the hydraulic fracturing geometry. We have shown that there is a reasonable agreement between the result of pseudo 3D fracture geometry model and the predicted results from the proposed approach

Ключевые слова: ГРП, ДЛИНА ТРЕЩИНЫ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГИДРОРАЗРЫВА,
МАТЛАВ, ОПТИМИЗАЦИЯ

Keywords: HYDRAULIC FRACTURING, FRACTURE
LENGTH, MATHEMATICAL MODELING,
FRACTURE GEOMETRY MODELS, MATLAB,
OPTIMIZATION

Введение

В настоящее время, особенно последние десятилетие, основные усилия специалистов направлены на обеспечение приемлемой математической модели для проектирования ГРП. Одна из самых простых моделей, является двумерная (2D) модель KGD, которая позволяет рассчитать ширину трещины в зависимости от длины. Другой простой двумерной моделью, является модель PKN, которая описывает ширину трещины в зависимости от высоты трещины [1].

Barree R. в соавторстве в 2005 году предоставил подробные оценки по ведению трещины гидроразрыв пласта скважины с непрерывным анализом распространения, анализом давления ГРП и оценкой геометрии трещин, с использованием фактических данных месторождений плотным коллектором газовых месторождений в области “Rocky Mountain”. Автором были объяснены наблюдаемые изменения производительности скважины, и представлены результаты сравнения реальных эффективных длин трещины с данными физических моделей. Описаны проблемы, связанные с семантикой и непоследовательностью полученных данных по геометрии трещин для данного коллектора. В представленной статье рассмотрены особенности происходящих в пласте физических процессов, описываемых различными аналитическими методами. Были изложены методы для прогнозирования эффективной длины трещины в зависимости от имеющихся данных по характеристикам проппанта и проницаемости коллектора [2].

Mohan J. в соавторстве в 2006 году представил аналитическое выражение для определения оптимальной длины трещины при ГРП для газовых и газоконденсатных скважин с учетом и без учета закона Дарси. Было показано, что оптимальная длина трещины зависит главным образом от ее проводимости, проницаемости пласта, размера зоны дренирования вокруг трещины, объема проппанта и мощности пласта [3].

Киполла в соавторстве в 2009 году оценил, сложность проведения ГРП в условиях не стационарной фильтрации много фазных потоков, сложной геометрией трещин, а также их влияние на полученные результаты. Эти исследования выявили существенные различия в методиках определения «эффективной» длины трещины которые во многих случаях, могут, в условиях неопределенности, влиять на геометрию трещин и дизайн (технологию) проведения ГРП. Также в работе приведенные исследования, по

нескольким месторождениям с примерами применения различных технологий, для определения эффективной длины трещины [4].

Исследование ГРП в нефтеносном песчанике на юго-западе Ирана

В настоящее время большинство нефтяных месторождений в Иране находятся на завершающей стадии разработки, характеризующейся снижением добычи нефти и массовым применением методов вторичной добычи или методов интенсификации добычи нефти. Некоторые коллекторы изначально имеют хорошие запасы нефти в пласте, но они не обладают желаемой пропускной способностью. Именно поэтому методы стимуляции скважин являются необходимыми для повышения проницаемости.

Характеристика исследуемого месторождения

Исследуемое месторождение представлено асимметричной антиклиналью, длиной 11 км и шириной 3 км. Коллектор представлен песчаником, в котором выявлено 16 нефтеносных пластов. Его нефть является относительно тяжелой с API степени 25. Газонефтяной фактор оценивается в 124,3 м³/м³ (700 фут³/баррель). Объемный коэффициент пластовой нефти (Vo) составляет около 1,4. Это недавно разведанное месторождение нефти, находящееся в настоящее время в стадии начала разработки. Месторождение находится в условиях недонасыщения при отсутствии газовой шапки. Месторождение имеет 16 нефтяных пластов с суммарной толщиной 196 м (643 футов). Трехмерная структура коллектора «Z» с 16-ю нефтяными пластами представлена на рисунке 1.

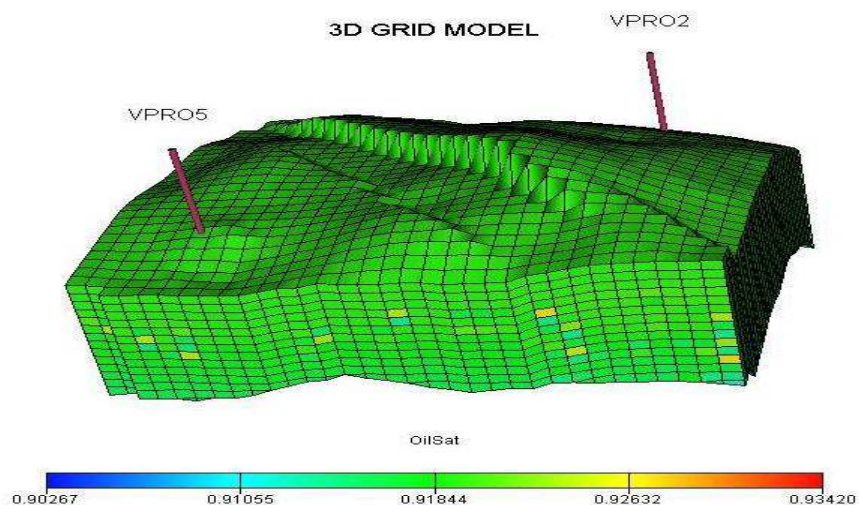


Рисунок 1 – Трехмерная модель структуры коллектора «Z»

Геологическая характеристика коллектора и свойства пластовых жидкостей изучаемого месторождения представлены в таблице 1.

Характеристики статической модели месторождения представлены в таблице 2. N_x ; N_y и N_z являются количество блоков сетки в x; y и z направлении. D_x , D_y и D_z являются длина каждого блока сетки в X, Y и Z направлениях.

Таблица 1 – Геологическая характеристика коллектора и свойства пластовых жидкостей изучаемого месторождения

Свойство	Значение	Свойство	Значение
API	25	коэффициент пластового объема нефти	1,4
Общая толщина, м	196	Вязкость нефть, сП	0,68
Газовый фактор, м ³ /м ³	124,3	Вязкость газа, сП	0,021
Сжимаемость породы, МПа ⁻¹	4,1*10 ⁻⁴	Пластовая температура, °С	60
Средняя пористость, %	12,5	Давление пузырьков, МПа	13,6
Средняя горизонтальная проницаемость, мД	154,55	Средняя пластового давления, МПа	24
Средняя вертикальная проницаемость, мД	2,1	Первоначальные запасы нефти, м ³	51,03*10 ⁶
Первоначальная нефтенасыщенность, %	79		

Таблица 2 – Характеристики статической модели исследуемого месторождения

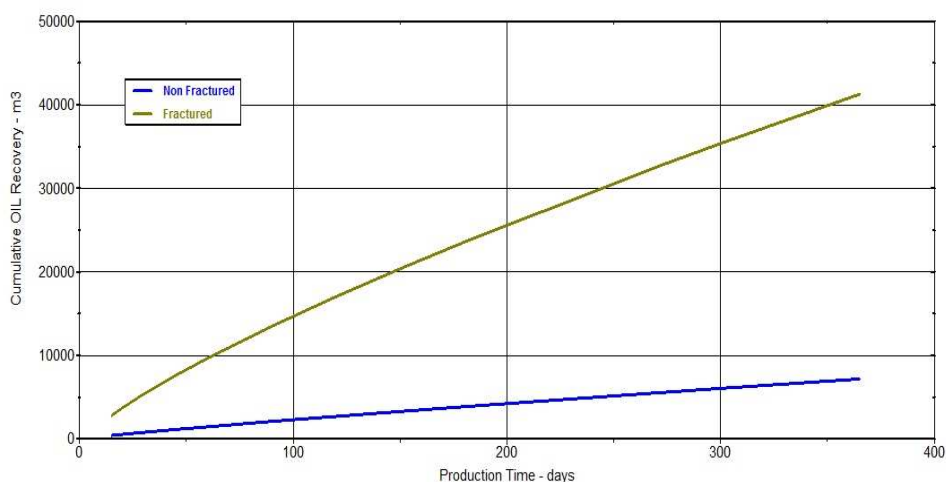
Свойства	Значение	Свойства	Значение
N_x	32	D_x , м	357,29
N_y	32	D_y , м	360,61
N_z	16	D_z , м	0,4-20
Число нефтяных пластов	16	Число сеток	16384

Анализ влияния длины трещины на повышение производительности скважины в нефтеносном песчанике с помощью симулятора «FracCADE»

Цель анализа этот сценарий является оптимизация длины трещины в нефтеносном неконсолидированном песчанике. В этом разделе определяется оптимальное значение длины трещины на основе анализа влияния параметра длины трещины на увеличение накопленной добычи нефти по скважине [5]. Были разработаны три сценария для оптимизации длины трещины с использованием программы «FracCADE». В этих сценариях в псевдо трехмерной модели (P3D) были рассмотрены длины трещины в 168, 260 и 350 м (550, 850 и 1150 фут).

а) Сценарий 1-А: Длина трещины = 168 м (550 футов)

В этом сценарии была рассмотрена длина трещины 168 м (550 футов). Расход насоса был принят равным $5,56 \text{ м}^3/\text{мин}$. Далее с использованием псевдо трехмерной модели (P3D) моделировалась работа скважины с такими параметрами трещины в течение одного года. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

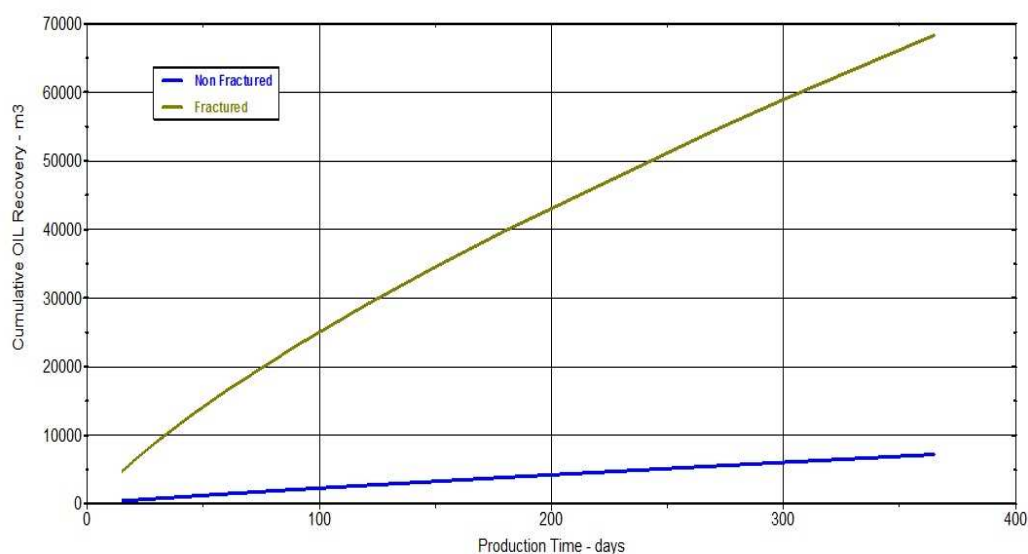


Schlumberger

Рисунок 2 – Прогноз суммарной нефтеотдачи в течение одного года с длиной трещины 168 м

b) Сценарий 5-В: Длина трещины = 260 м (850 футов)

В этом сценарии длина трещины была рассмотрена 850 футов (260 м). Расход насоса были принята равной 5,56 м³/мин. Затем продуктивности скважины была моделируется в течение одного года с использованием псевдо трехмерной модели (P3D). Результаты этого моделирования представлены на рисунке 3.



Schlumberger

Рисунок 3 – Прогноз суммарной нефтеотдачи в течение одного года с длиной трещины 260 м

с) Сценарий 5-С: Длина трещины = 350 м (1150 футов)

В этом сценарии длина трещины была рассмотрена 1150 футов (350 м). Расход насоса были принята равной 5,56 м³/мин. Затем продуктивности скважины была моделируется в течение одного года с использованием псевдо трехмерной модели (P3D). Результаты этого моделирования представлены на рисунке 4.

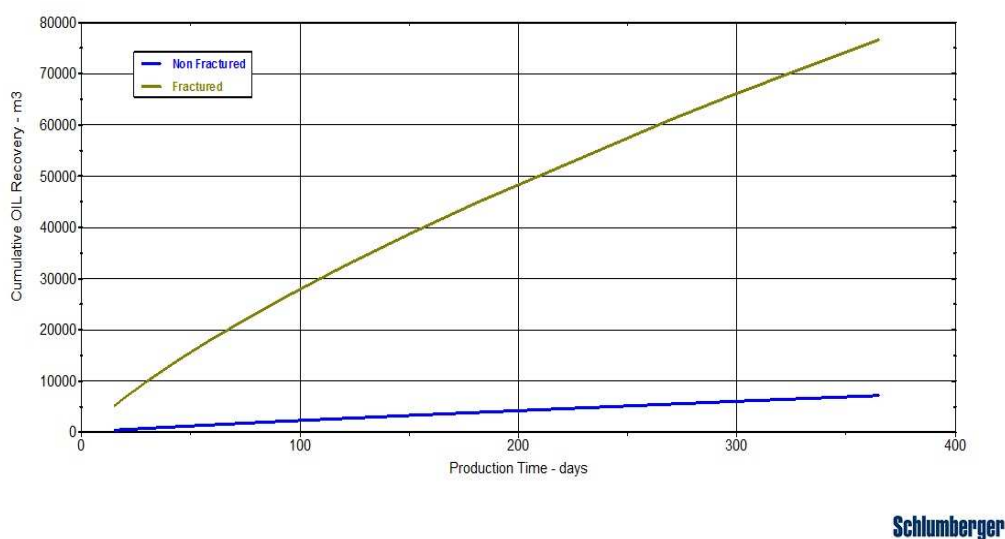


Рисунок 4 – Прогноз суммарной нефтеотдачи в течение одного года с длиной трещины 350 м

Путем сравнения сценариев, которые связаны с увеличением длины трещины, пришли к выводу, что при увеличении длины трещины производительность скважины улучшается. В коллекторе «Z» увеличение длины трещины от 168 до 260 м (550 до 850 футов) дало значительное увеличение накопленной нефтеотдачи, которое оценивается примерно в 27028 м³. Кроме того, в этом исследовании было обнаружено, что при увеличении длины трещины от 260 до 350 м (850 футов до 1150), темп падение продуктивности скважины был значительно снижен .

Увеличение накопленной добычи нефти путем повышения длины трещины с 260 до 350 м (850 футов до 1150), по нашим оценкам, составило около 8344 м³. Поэтому в данном исследовании, длина трещины в 260 м (850 фут) считалась оптимальным значением для исследуемого нефтяного коллектора. Основными причинами значительной разницы в накопленной добыче нефти в сценариях (1-А) и (1-В) являются, увеличение эффективного

радиуса скважины, уменьшения скин-фактора, а также увеличение проницаемости вокруг области ствола скважины при увеличении длины трещины. Потому что, очевидно радиус скважины напрямую зависит от длины трещины. В сценарии (1-В) длина трещины вырос примерно в 300 футов (91 м) по сравнению со сценарием (1-А). При более высоких значениях длины трещины падение пластового давления быстро увеличивается, поэтому наклон кривой продуктивности скважины снижается. Это явление наблюдается в сценарии (1-С), где длина трещины возросла до 350 м (1150 футов).

Методология новой математической модели для оптимизации длины трещины

В этом исследовании, для определения оптимальной длины трещины при нагнетании, были преобразованы уравнение эффективности гидравлического разрыва «Notle и Economides» [6]. В этом исследовании, с учетом максимальной эффективности ГРП, длины трещины был определен с помощью метода проб и ошибок. Все численные уравнения, которые управляют моделированием ГРП, в этом исследовании были закодированы с помощью программы «MATLAB». В предлагаемом подходе, средняя ширина трещины была определена, как показано ниже:

$$W_{av,new} = \frac{1.5W_{av,RFM} + 0.75W_{av,PKN} + 0.75W_{av,KGD}}{3}, \quad (1)$$

где $W_{av,RFM}$, $W_{av,PKN}$ и $W_{av,KGD}$ – средняя ширина трещины в моделях «FRM», «PKN» и «KGD».

Как уже упоминалось в предыдущих разделах, поскольку модель радиальной трещины (RFM) является более надежной, чем другие модели

ГРП, «RFM» умножается на коэффициент (1,5). Поэтому модель «RFM» имеет большую долю в расчетах в предлагаемом подходе. На самом деле предложенная модель является комбинацией моделей «PKN», «KGD» и «RFM». Одним из преимуществ, предложенной модели, является использование преимуществ различных моделей ГРП. На рисунке 2 представлены алгоритм для оптимизации расход закачки при ГРП.

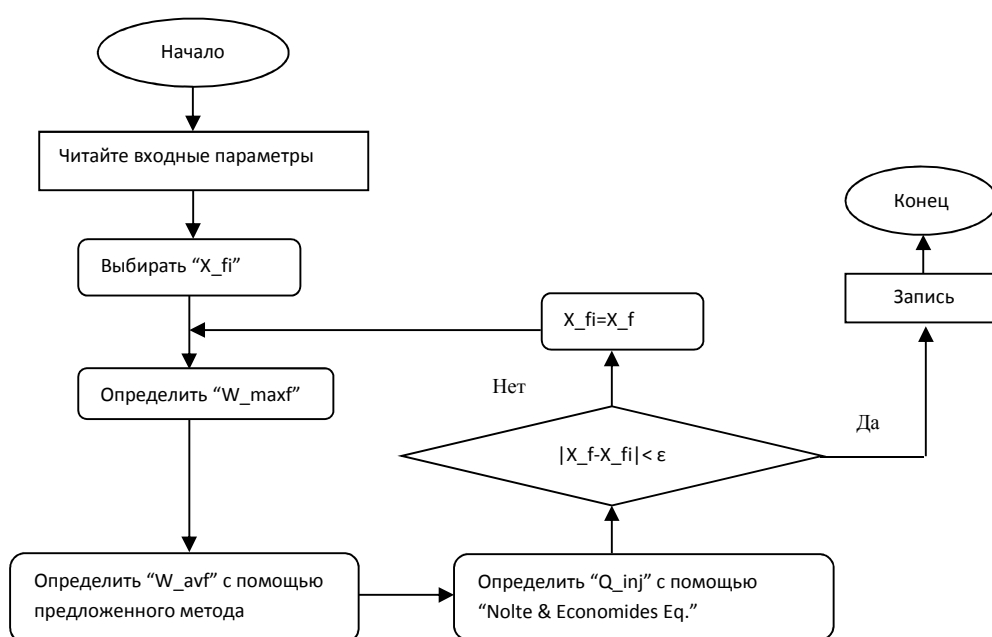


Рисунок 5 – Алгоритм для оптимизации длины трещины при ГРП

Предложенный алгоритм включает доступные входные данные, такие как: реологические свойства закачиваемой жидкости, физические свойства породы и жидкости пласта. Кроме того, максимальный расход закачки жидкости считается – 4,45 м³/мин. Алгоритм для оптимизации длины трещины при ГРП, кратко изложен следующим образом:

1. Ввод необходимых данных, упомянутых выше.
2. Выбор первоначального значения длины трещины при ГРП.

3. Определение максимальной ширины трещины ($W_{max,f}$) для неньютоновских жидкостей с использованием модели "RFM".

4. Определение средней ширины трещины разрыва с использованием предлагаемого подхода.

5. Определение нового значения длины трещины при ГРП с помощью уравнения "Nolte и Economides".

6. Расчет абсолютной разности между оцененной длиной трещины в шаге 5 и значением в шаге 2.

7. Переход к следующему шагу, если абсолютная разница меньше, чем значение эпсилон (ϵ). В противном случае, необходимо заменить значение, которое рассчитывалось при шаге 5 вместо значения, которое рассчитывалось при шаге 2 и повторить операцию.

8. Конец вычислений и записи.

Оптимальная длина трещины, с предлагаемым подходом в данном исследовании, была оценена примерно в 242 м (794 фута).

Поскольку коллектор нефтенасыщенного песчаника «Асмари» в нефтяном месторождении «Azadegan» содержит тяжелую нефть, вполне уместно применение тепловых методов повышения нефтеотдачи пластов для повышения накопленной добычи в дополнение к ГРП [7].

Литература

1. Rocket A. R. C., Oksus N. M. A Complete Integrated Model Design and Real Time Analysis of Hydraulic Fracturing Operations// Society of Petroleum Engineering. 1986. 15069-MS.
2. Barree R., Cox S., Gilbert J., Dobson M. Closing the Gap: Fracture Half Length from Design, Buildup, and Production Analysis// Journal of SPE Production & Facilities. November 2005. Vol. 20, Issue 04, DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/84491-PA>.
3. Mohan J., Sharma M., Pope G. Optimization of Fracture Length in Gas/Condensate Reservoirs// SPE Gas Technology Symposium. May 2006. Calgary, Alberta, Canada, SPE-100543-MS.

4. Cipolla C., Lolon E., Mayerhofer M. Resolving Created, Propped, and Effective Hydraulic-Fracture Length// Journal of SPE Production & Operations. November 2009. Vol. 24, Issue 04, S. 619-628.
5. Economides M. J., Hill D. A., Ehlig-Economides CH. Petroleum Production System // Prentice PTR, New Jersey 07458, 1993, pp. 428-433.
6. Nolte K. G., Economides M. J. Fracturing, Diagnosis Using Pressure Analysis, in Reservoir Stimulation// 2nd ed., Prentice Hall Englewood Cliffs, 1989.
7. Green W.D., Willhite G.P. Enhanced Oil Recovery// SPE Textbook Series. (1998). S. 302-430.

References

1. Rocket A. R. C., Oksus N. M. A Complete Integrated Model Design and Real Time Analysis of Hydraulic Fracturing Operations// Society of Petroleum Engineering. 1986. 15069-MS.
2. Barree R., Cox S., Gilbert J., Dobson M. Closing the Gap: Fracture Half Length from Design, Buildup, and Production Analysis// Journal of SPE Production & Facilities. November 2005. Vol. 20, Issue 04, DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/84491-PA>.
3. Mohan J., Sharma M., Pope G. Optimization of Fracture Length in Gas/Condensate Reservoirs// SPE Gas Technology Symposium. May 2006. Calgary, Alberta, Canada, SPE-100543-MS.
4. Cipolla C., Lolon E., Mayerhofer M. Resolving Created, Propped, and Effective Hydraulic-Fracture Length// Journal of SPE Production & Operations. November 2009. Vol. 24, Issue 04, S. 619-628.
5. Economides M. J., Hill D. A., Ehlig-Economides CH. Petroleum Production System // Prentice PTR, New Jersey 07458, 1993, pp. 428-433.
6. Nolte K. G., Economides M. J. Fracturing, Diagnosis Using Pressure Analysis, in Reservoir Stimulation// 2nd ed., Prentice Hall Englewood Cliffs, 1989.
7. Green W.D., Willhite G.P. Enhanced Oil Recovery// SPE Textbook Series. (1998). S. 302-430.