

Ст а т ь я

Исслед ование т рехмерног о многок ласт ерног о ГРП Мод елирование под воз д ейст вием ест ест венных т рещин

Юган Ли 1, Минъя н Ву 2, Хаюнь Хуан 3,4,* , Инь т ун Го 2, Юйц з е Ван 5, Ц з юнь ч уань Гуй 3,4 и Ц з юнь Лу 6

1 Chongqing Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Чунц ин 401120, К ит ай; li_yg@petrochina.com.cn
2 Государст венная

к л ю н е в а я л а б о р а т о р и я г е о м е х а н и к и и г е о т е х н и ч е с к о й и н ж е н е р и и, У х а н ь с к и й и н с т и т у т м е х а н и к и г о р н ы х п о р о д и г р у н т о в,
К и т а й с к а я а к а д е м и я н а у к , У х а н ь 430071, К и т а й; wmy@cqu.edu.cn (MW); ytguo@whrsm.ac.cn (YG)

3 Науч но-исслед оват ель с к и й и н с т и т у т с л а н ц е в о г о г а з а Ю о - з а п а д н о й н е ф т е г а з о в о й к о м п а н и и PetroChina, Чэ н д у 610051,
К и т а й; guijunchuan@petrochina.com.cn

4 Сын уань с к а я к л ю н е в а я л а б о р а т о р и я п о о ц е н к е и р а з р а б о т к е с л а н ц е в о г о г а з а, Чэ н д у 610051,
К и т а й 5 PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Чэ н д у 610051, К и т а й 6

И н с т и т у т г л у б и н н ы х н а у к о З е м л е и з е л е н о й э н е р г и и, К о л л е д ж г р а ж д а н с к о г о и т р а н с п о р т н о г о
м а ш и н о с т р о е н и я , Шэ н ь ч жэ н ь с к и й у н и в е р с и т е т , Шэ н ь ч жэ н ь
518060 , К и т а й; junlu@szu.edu.cn * П е р е п и с к а : huang_hy@petrochina.com.cn

А н н о т а ц и я : М у л ь т и к л а с т е р н ы й Г Р П с т а л э ф ф е к т и в н ы м м е т о д о м п о в ы ш е н и я п р о д у к т и в н о с т и г л у б о к и х с л а н ц е в ы х
к о л л е к т о р о в . Н а л и ч и е е с т е с т в е н н ы х п л о с к о с т е й н а п л а с т о в а н и я в э т и х к о л л е к т о р а х и г р а е т з н а ч и т е л ь н у ю р о л ь в
ф о р м и р о в а н и и э в о л ю ц и и и р а з в и т и я м н о г о к л а с т е р н ы х т р е щ и н Г Р П .
П о э т о м у п р о в е д е н и е д е т а л ь н ы х и с с л е д о в а н и й м е х а н и з м о в р а с п р о с т р а н е н и я м у л ь т и к л а с т е р н ы х г и д р о р а з р ы в о в в г л у б о к и х
с л а н ц е в ы х п л а с т а х и м е е т р е ш а ю щ е з н а ч е н и е д л я о п т и м и з а ц и и э ф ф е к т и в н о с т и т р а н с ф о р м а ц и и к о л л е к т о р а и д о с т и ж е н и я
э ф ф е к т и в н ы х р e з у л ь т а т о в р а з р а б о т к и . В э т о м и с s l e d o в а н и и и с п о л ь з у е т с я м e t o d к о н е ч н ы х д и с к р е т н ы х э л e м e н т o в (FDEM)
д л я п o c т p o e н и я к o m п л e к с н o й т p e x м e p н o й и м и т а ц и o n н o й м o д e л и м н o г o k л a c t e p н o г o г и d p o p a z p ы в a c y ч e t o m k o л и ч e c t в a
п p и с y c t в y ю щ и x e c t e c t в e n н ы х т p e щ и н и г e o м e x a н и ч e c k и x x a p a k т e p и c t и к ц e л e в o г o б л o к a . P a c п p o c t p a n e н и e г и d p o p a z p ы в o в
и c c л e д y e т c я в з a в и c и м o c t и o t k o л и ч e c t в a e c t e c t в e n н ы х т p e щ и н и д и з a й н a o п e p a ц и й м у л ь т и k л a c t e p н o г o p a z p ы в a п л a c t a .
P e з y л ь т a т ы м o d e л и p o в a н и я п o k a з ы в a ю т , ч т o , в c o o т в e c t в и и c п p e д ы д y щ и м и и c c л e d o в a н и я м и п o т p e щ и н o в a t o c t и в
c л a n c e в ы x м e c t o p o ж д e н и я x н e ф т и и г a з a , y в e л и ч e н и e к o л и ч e c t в a k л a c t e p o в т p e щ и н и e c t e c t в e n н ы х т p e щ и н п p и в o д и т к
y в e л и ч e н и ю o б щ e й п л o щ a d и , п o k p ы т o y и c k y c c t в e n н ы м и т p e щ и н a м и , и p a з в и т и ю б o л e e c л o ж н ы x c t p y k т y p т p e щ и н . K p o м e т o г o ,
н a c т o я щ e e и c c л e d o в a н и e п o d ч e p к и в a e т , ч т o y в e л и ч e н и e к o л и ч e c t в a k л a c t e p o в т p e щ и н o в a t o c t и п p и в o д и т k з a м e т н o м y
y м e н ь ш e н и ю c б a л a н c и p o в a n н o г o p a c ш и p e н и я д в o й н ы x к p ы л ь e в o c н o в н o й т p e щ и н ы в н y т p и п л a c t a . B м e c t o э т o г o э ф ф e к т ы
e c t e c t в e n н ы х т p e щ и н , г e o н a п p ы ж e н и я и д p y г и x ф a k т o p o в c п o c o б c t в y ю т y c и л e н и ю т a k и x я в л e н и й , k a k p a c ш и p e н и e o d н o г o
к p ы л a , б и ф y p k a ц и я и и з г и б p a з л и ч н ы x o c н o в н ы х т p e щ и н , c п o c o б c t в y ю т c o з д a н и ю c л o ж н ы x c e т e й и c k y c c t в e n н ы х т p e щ и н . B a ж н o
o t м e т и т ь , ч т o н a л и ч и e e c t e c t в e n н ы х т p e щ и н т a k ж e м o ж e т c y щ e c t в e n н o и з м e н и т ь p e ж и м p a з p y ш e н и я и c k y c c t в e n н ы х
т p e щ и н , ч т o п o т e n ц и a л ь н o м o ж e т п p и в e c t и k o б p a з o в a н и ю н e б o л ь ш и x o t k p ы в a ю щ и x c d в и г o в ы x т p e щ и н , ч т o т p e б y e т
т щ a t e л ь н o y o ц e n k и o б щ e г o в o з д e й c t в и я p e k o н c t p y k ц и и . B o л e e т o г o , д a n н o e и c c л e d o в a н и e п o k a з ы в a e т , ч т o д a ж e п o
c p a в н e н и ю c o d н o k л a c t e p н o й т p e щ и н o в a t o c t ь ю n a л и ч и e в p e г и o н e 40 e c t e c t в e n н ы х м a г и c t p a л ь н ы х т p e щ и н м o ж e т п p и в e c t и
k p a з в и т и ю м н o ж e c t в e n н ы x в e т в я щ и x c y м a г и c t p a л ь н ы х т p e щ и н . Э т o т ы в o d п o d ч e p к и в a e т в a ж н o c t ь y ч e t a e c t e c t в e n н ы х
т p e щ и н п p и o п e p a ц и я x г л y б o k o г o p a z p ы в a п л a c t a . B з a k л ю ч e н и e , p e з y л ь т a т ы т o г o и c c л e d o в a н и я д a ю т ц e н н y ю и н ф o p m a ц и ю
д л я o п т и м и з a ц и и п p o ц e c c o в г л y б o k o г o p a z p ы в a п л a c t a в c ц e н a p и я x , г д e e c t e c t в e n н ы e т p e щ и н ы и г p a ю т ж и в e n н o в a ж н y ю
p o л ь в ф o p m и p o в a н и и т p e щ и н .

Ц и т и p o в a н и e : Л и , Ю В у , М ; Х у а н г , Х . ; Г о , Ю В а н ,
Ю Г у и , Д ж ; Л у , Д ж . И с с л e d o в a н и e т p e x м e p н o г o
м o d e л и p o в a н и я м н o г o k л a c t e p н o г o
г и d p o p a z p ы в a
п o d в л и я н и e м п p и p o д н ы х
П е р e л o м ы П p и л . н a y k . 2024, 14, 6342. <https://doi.org/10.3390/app14146342>.

А к а д e м и ч e c к и й p e d a k т o p Т ь я г o М и р a н д a

П o c т y п и л a : 26 м а я 2024 г .

П e p e c м o т р e н o : 9 и ю л я 2024 г .

П p и н я т o : 19 и ю л я 2024 г .

П y б л и к o в a н o : 20 и ю л я 2024 г .



К o п и p a й т : © 2024 a в т o p o в . Л и -
c e n s e e M D P I , Б a з e л ь , Ш в e й ц a p и я .

Э т a c т a т ь я н a x o д и т c я в o t k p ы т o m o c t y e .
p a c п p o c t p a n e т c я н a y c л o в и я x и k o н -
п o л o ж e н и я м и C r e a t i v e C o m m o n s A t -

т p e щ и н ы н a p a c п p o c t p a n e н и e (C C B Y) ([https://cre-](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
[ativecommons.org/licenses/by/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

К л ю н e в ы e c л o в a : м у л ь т и к л a c t e p н ы й Г Р П ; г л у б o k и e в o d o e м ы Ф Д Е М ; в ы c o к а я г e o н a п p ы ж e n н o c t ь ; p a c п p o c t p a n e н и e т p e щ и н ы

1. Введение

Нефтяные и газовые ресурсы продолжают играть значительную роль в мировой энергетической сфере. Поэтому существует острая необходимость увеличения добычи и использования этих ресурсов [1]. Запасы сланцевой нефти и газа на глубинах более 3500 м составляют огромную долю современной энергетической структуры. Оптимизация строительства и эксплуатации глубоких запасов нефти и газа с помощью их технологий строительства, как многокластерный разрыв пласта, является необходимым средством достижения эффективной эксплуатации глубоких запасов нефти и газа [2]. Примечательно, что глубокие залежи нефти и газа часто встречаются в высоконапряженных средах со сложными характеристиками трещиноватости (прерывистые структуры) такие как напластования, трещины и трещины образующие седиментационными и тектоническими процессами глубоких резервуаров [3], что существенно влияет на эффективность трансформации пласта [4,5]. Поэтому углубленное изучение влияния естественных трещин на технологии строительства МГРП глубоких залежей нефти и газа имеет большое значение для разработки глубоких ресурсов нефти и газа.

Для изучения распространения трещин гидроразрыва можно использовать как теоретические решения, так и лабораторные испытания. За прошедшие годы посредством теоретических выводов были созданы различные модели теоретических решений, такие как модель KGD, модель PKN и модель Пенни и другие [2,6–10]. Между тем, некоторые ученые в своих исследованиях обнаружили, что в пласте может существовать несколько механизмов контура из-за влияния вязкости и разрушения и скороствления трещин в породах-коллекторах. Таким образом, была получена теоретическая модель распространения искусственных трещин в пластах под воздействием комплексных параметров, таких как контурная вязкость и контурная ударная вязкость. Однако в теоретических выводах часто предполагается, что порода-коллектор представляет собой однородную изотропную среду, а это означает, что влияние естественных трещин и рост многочисленных групп трещин не могут быть учтены. Конечно, ученые также провели обширные исследования физического моделирования с использованием лабораторных экспериментальных методов [5,11–15]. Начальные этапы преимущественно использовались традиционные ретроспективные системы разрушения, ориентированные на влияние геонапряжения пласта путем контура окружающей породы осевого давления. Однако реальные резервуары обычно испытывают стрессовые условия при истинном ретроспективном напряжении, что побудило некоторых исследователей разработать автономные ретроспективные экспериментальные установок для моделирования трещиноватости от одного до нескольких кластеров. Благодаря этим экспериментам они смогли получить представление о закономерностях распространения искусственных. Тем не менее, воспроизведение воздействия естественных трещин в лабораторных условиях оказывается сложной задачей, и необходимы дальнейшие исследования для переноса результатов в масштабах образцов в скважинах в масштабах резервуара. Следовательно, растет интерес к моделированию гидроразрыва пласта в масштабе пласта [16,17].

Принцип мультикластерного ГРП в плотных коллекторах показан на рисунке 1. Этот метод включает в себя создание множества сетевой гидроразрывов в различных блоках пласта путем стратегического определения нескольких позиций перфорации и регулирования распределения жидкости по различным кластерам. Главной целью является повышение проницаемости коллектора и содействие эффективной разработке. Моделирование раннего разрыва пласта в основном осуществлялось с помощью методов конечных элементов. В дальнейшем, учитывая, что породы коллектора представляют собой разрывную среду, были последовательно предложены некоторые новые методы численного моделирования, такие как расширенный метод конечных элементов [18], метод дисперсии потока частиц [19,20], блочный метод дискретных элементов [2]., метод разрывных элементов [21], метод конечных дискретных элементов (FDEM) [22] и др. Эти методы позволяют более точно прогнозировать эффект конструкции разрыва пласта целевого пласта, но они имеют различные преимущества и ограничения. Например, расширенный метод конечных элементов использует виртуальные функции для построения прерывистого поля перемещений, которое может моделировать влияние отклонения и распространения трещины в нулевом элементе, но сложно моделировать влияние естественных трещин и других факторов. например, бифуркация перелома. Метод элемента дисперсии потока частиц имеет превосходные результаты при моделировании трещиноватости коллектора на микромасштабе, но обычно предполагается, что коллектор состоит из частиц, что имеет большое значение.

вынужденные ограничения и больше не подходят для анализа моделирования в масштабе резервуара [23,24]. Метод блокных дискретных элементов и метод конечных дискретных элементов, разработанные в последние годы эффективно решили ограничения масштаба, что позволяет лучше моделировать и оценивать трещиноватость пласта на микро- и макромасштабах. Среди них метод конечных дискретных элементов [25] предполагает, что коллектор состоит из блоков горных пород и их трещиноватых границ раздела (рис. 1). Элементы блоков породы используются для моделирования деформационных характеристик матрицы коллектора в процессе гидроразрыва, а элементы интерфейса – для моделирования распространения искусственных трещин в пласте. Между тем, с годами разработки и характеристики естественных трещин в коллекторах можно описать путем изменения таких параметров, как прочность и жесткость различных элементов интерфейса, тем самым достигая моделирования трещиноватости в коллекторах, содержащих естественные трещины. На основе метода FDEM Wu et al. [26] провели исследование по моделированию гидроразрыва пласта с учетом естественной границы раздела напластований и трещин в горных породах. Их результаты подтвердили живую неспособность использования FDEM для моделирования образования трещин в горных породах, содержащих такие природные особенности. Кроме того, они разработали модели гидроразрыва пласта для пластов с учетом различных неоднородных структур и провели детальный анализ влияния таких факторов, как естественные дискретные трещины и крупнее заглубленные блоки горных пород, на распространение гидроразрывов [27].

Таким образом, проведение моделирования трещиноватости в трещиноватых коллекторах с использованием FDEM оканчивается эффективным методом влияния поведения распространения гидравлических трещин в породах-коллекторах, содержащих естественные трещины.

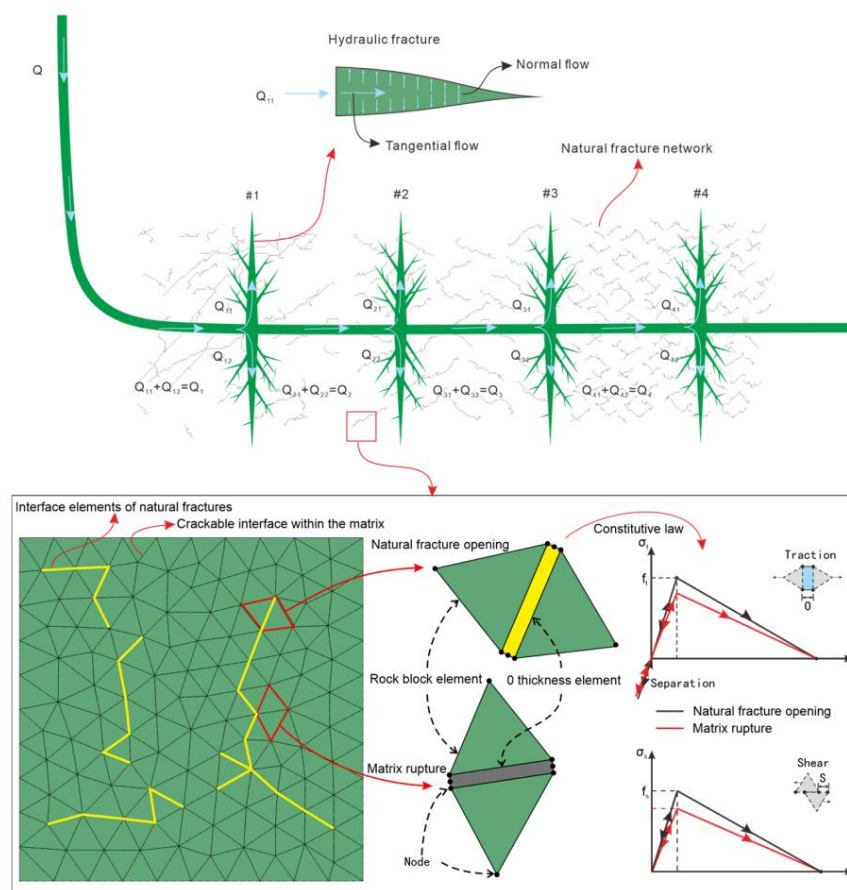


Рис. 1. Принципиальная схема мультимасштабного разрыва пласта и принципа FDEM.

На основе метода конечных дискретных элементов (FDEM) в данной статье создана трехмерная модель многомасштабного гидроразрыва пласта с учетом количественных характеристик естественных трещин. Для систематического анализа закона расширения использовались радиальные количественные параметры такие как площадь трещины, длина трещины, максимальная апертюра трещины.

искусственных трещин под совместным воздействием естественных трещин и мультимасштабного трещиноватости. Численная модель, результаты сравнительного анализа и выводы представлены в разделах 2, 3 и 4 соответственно.

2. Численная модель

В этой статье для построения модели FDEM используются связанные элементы/элементы блок горных пород [28–30] и разделяются связанные элемент/элементы внутри матрицы связанных элементов представляющие естественные трещины что обеспечивает моделирование многомасштабного разрыва пластов, содержащих естественные трещины. Подробные уравнения моделирования следующие.

2.1. Метод моделирования

Мультимасштабный гидроразрыв пласта представляет собой типичный процесс соединения флюидных структур, который включает взаимодействие флюидов и твердых тел. При рассмотрении взаимодействия жидкостей и твердого тела во время ГРП уравнение баланса напряжений ГРП может быть выражено как [31] (

$$\sigma_{пш}(\delta\delta)_{ДВ} = \tau \frac{dV}{dV} \delta \quad (1)$$

где $\sigma_{пш}$ – матрица эффективных напряжений, МПа; обозначает поровое давление, МПа; τ – матрица скорости виртуальной деформации; $\delta\delta$ – матрица поверхностных сил, Н/м²; (м/с) и (Н/м³) — матрица виртуальной скорости и матрица физических силы

В процессе гидроразрыва плотность жидкостей и пористость матрицы влияют на поведение жидкостей внутри пласта. Уравнение непрерывности жидкостей отражает сохранение массы во время этого процесса, обеспечивая математическое представление движения и распределения жидкостей. Это позволяет более точно описать динамику движения жидкостей в пласте [32].

$$\frac{D}{dt} \left(\frac{\rho_{ш}}{\rho_{ш0}} n dV \right) + \frac{\rho_{ш}}{\rho_{ш0}} \nabla \cdot \mathbf{d} = 0 \quad (2)$$

где $\frac{D}{dt}$ представляет собой коэффициент изменения объема, безразмерный; $\rho_{ш}$ – плотность жидкостей, кг/м³; $\nabla \cdot \mathbf{d}$ – коэффициент пустотности, безразмерный; $\frac{\rho_{ш}}{\rho_{ш0}}$ – скорость просачивания жидкостей, м/с.

Важно отметить, что процесс гидроразрыва также включает в себя влияние просачивания жидкостей внутри матрицы. Филтративное поведение пород-коллекторов во время гидроразрыва можно рассчитать с помощью закона Дарси, который определяет скорость и расход флюидов с помощью их факторов, как вязкости жидкостей, проницаемости и градиент давления [33]:

$$\mathbf{v} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

где $\mathbf{v}$ представляет собой матрицу проницаемости, м/с, μ – вектор ускорения сил вязкости, м/с².

Когда жидкость начинает просачиваться в массив пород-коллектора, приток жидкости приведет к повышению порового давления, что, как следствие, будет способствовать распространению микротрещин. Принято считать, что дооткрытия гидроразрывов когезионные элементы используются для моделирования гидроразрывов, подчиняются линейно-упругому соотношению [6],

$$\sigma_{ну, да} = K_{ок, нс} \epsilon_{ну, да} \quad (4)$$

где обозначает вектор напряжений; касательное, — нормальное напряжение, первое напряжение и второе касательное напряжение соответственно. Здесь, обозначает жесткость

матрица; представляющая собой нормальное смещение, первое смещение и второе тангенциальное смещение соответственно. Здесь – констативная толщина.

При продолжении закачки жидкости в массиве пород-коллекторов постепенно будут возникать гидравлические трещины и это явление можно смоделировать путем моделирования повреждения и выхода из строя элементов интерфейса. При повреждении элемента интерфейса значительно снижается проницаемость элемента интерфейса, что приводит к быстрому раскрытию трещин гидроразрыва. Наличие или отсутствия элементов интерфейса можно определить по следующей формуле [34]:

$$\varepsilon_{\text{н-ст}} = \frac{D_{\text{н-ст}}}{T_{\text{н-ст}}} \quad \text{когда} \quad \varepsilon_{\text{н-ст}} > \varepsilon_{\text{н-ст}}^{\text{крит}} \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{н-ст}}$ – нормальное смещение, $D_{\text{н-ст}}$ – первое смещение и второе тангенциальное смещение соответственно. Здесь – констативная толщина.

При продолжении закачки жидкости в массиве пород-коллекторов постепенно будут возникать гидравлические трещины и это явление можно смоделировать путем моделирования повреждения и выхода из строя элементов интерфейса. При повреждении элемента интерфейса значительно снижается проницаемость элемента интерфейса, что приводит к быстрому раскрытию трещин гидроразрыва. Наличие или отсутствия элементов интерфейса можно определить по следующей формуле [34]:

$$\frac{\langle \sigma_{\text{н}} \rangle^2}{\sigma_{\text{н-ст}}^2} = \frac{\sigma_{\text{с}}^2}{\sigma_{\text{с}}^2} + \lambda \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{н}}$ – нормальное напряжение; $\sigma_{\text{н-ст}}$ – касательное напряжение, МПа; $\sigma_{\text{с}}$ – пороговое напряжение, МПа; λ – коэффициент, характеризующий сопротивление элемента напряжения растяжения, но не напряжения сжатия: $\lambda = 1,05$.

После того, как гидравлические трещины инициируются, трещины будут открываться бесконечно из-за таких факторов, как межфазные силы. Поведение деформации после достижения пика можно описать коэффициентами повреждения [28,35]:

$$E = (1 - \nu) E^0 \quad (7)$$

$$D = \frac{\delta_{\text{н-ст}}^{\text{Макс}} (\delta^0)}{\delta_{\text{н-ст}}^{\text{Макс}} (\delta^0)}, \quad (8)$$

где E – начальный модуль упругости и модуль упругости после повреждения, Па соответственно. Здесь d – коэффициент повреждения, безразмерный. Обозначают отдельные смещения в контексте поведения элемента. В частности, отсылка к максимальному испытанному смещению и обозначением перемещение.

При выполнении мультисквадрового ГРП закачиваемая жидкость будет поступать в пласт через скважину, что приводит к распределению потока внутри скважины. При этом из-за длинного столба скважины также наблюдается соответствующий перепад давления.

$$Q = \frac{H}{\mu} \quad (9)$$

$$p = p_{\text{ср}} + p_{\text{грав}} \quad (10)$$

Когда жидкость поступает в скважину из-за шероховатости и поверхности столба скважины легко возникает сопротивление потоку, и это поведение можно описать уравнением Бернулли [36]:

$$\begin{aligned}
 \Delta p_{\text{ср}} + \left(\frac{\Delta Z}{L} \right) \frac{\rho v^2}{2}, \\
 C_L = \frac{f_{\text{ср}}}{D_{\text{ср}}}, \\
 \text{ж} = 8 \frac{8}{Re^{12}} + \frac{1}{(AB)^{1,5}} \frac{1}{12}, \\
 A = 2,457B \frac{7}{Re^{0,9}} 0,27 + \frac{K_c}{D_{\text{ср}}} \frac{16}{16}, \\
 B = \frac{37350}{Re^{16}}, \\
 \text{пф} = 0,087249 \times \text{нДЦ} \frac{\rho}{2,42} \frac{v^2}{D_{\text{ср}}} \frac{2}{n}
 \end{aligned} \quad (11)$$

где ΔP – перепад давления в узле куста, ΔZ – перепад высот узла, v – скорость жидкостив стволеск важины ρ – плотность жидкост и, G – ускорение свободного падения, CL – коэффициент потерь, f – сила трения на стволеск важины L – длина стволеск важины K_i – коэффициент потерь в фиксированном направлении, K_s – шероховатость стволеск важины Dh – диаметр стволеск важины Re – число Рейнольдса, n – количество перфорации, D_p – диаметр перфорации, C – коэффициент, обычно 0,56–0,9 [6].

После того, как жидкость гидроразрыва будет отведена из стволеск важины она попадет в трещину гидроразрыва, и падение давления жидкост и внутри можно описать как

$$= \frac{q^3}{12 \mu} \frac{\tau}{a^3}, \quad (13)$$

где q – вектор объемного расхода на длину касательного элемента; t – толщина, μ – коэффициент вязкости; p – давление жидкост и, МПа.

Стоит отметить, что существует определенное влияние переток между жидкостью и используемой для гидроразрыва, и существующей жидкостью в пласте. Между тем, из-за высокого давления жидкост и в трещинах во время гидроразрыва в матрицу породы из трещин поступает больше жидкост и. В этот момент потери жидкост и в трещине составляют

$$= \frac{q_{\text{ср}} p}{6 \mu} \left(\frac{\tau}{a^3} \right), \quad (14)$$

где $q_{\text{ср}}$ – предельный объемный расход. Условия эффективности, μ – коэффициент фильтрации, мин0,5; $p_{\text{г}}$ – поровое давление, МПа; p – давление жидкост и, МПа.

2.2. Настройка

модели. Вынужденная сложность трехмерной (3D) модели гидроразрыва обычно различается по величине по сравнению с двумерной (2D) моделью гидроразрыва. Таким образом, по сравнению с 2D-моделью ЮРП, процесс 3D-моделирования существенно упростил модель. Основные части, связанные с изменениями, включают следующее: уменьшение геометрического размера модели и увеличение толщины слоя модели; При создании сетки использовалась максимальная возможная сетка, и после многократного геометрического моделирования и создания сетки была выбрана модель с подходящим количеством сетки и геометрией.

для последующего численного моделирования и анализа ГРП. Исходя из этого, конкретные условия, установленные для этой трехмерной имитационной модели, заключаются в следующем:

Целевой резервуар имеет значительную тенденцию к естественной стратификации, поэтому построение сетки и подстилок достигается с помощью программирования на Python.

По промышленным данным глубина целевого блока при моделировании обычно находится в диапазоне от 4018,5 м до 4263,5 м, при этом интервал стратификации ГРП обычно устанавливается равным 60 м. Для простоты моделирования предполагается, что размер площади резервуара при моделировании составляет 60 м × 60 м × 3 м.

Во время гидроразрыва жидкость будет перетекать из ствола скважины в целевой пласт. Элементы `fr3d2` используются для моделирования падения давления жидкости и распределения потока в стволе скважины, а элемент `fr3d2` используется для моделирования сопротивления трения, когда скважинная жидкость поступает в целевую область пласта. Путем привязки узлов можно добиться моделирования процесса течения жидкости из ствола скважины в целевой пласт. Кроме того, учитывая сложность расстояния между перфорациями во время стратификации гидроразрыва целевого пласта, при моделировании также задаются 38 случайных перфораций (Рисунок 2b). На основании собранных на месте данных целевой блок

демонстрирует типичные характеристики и опускания углекислого бассейна. Таким образом, путем совмещения направлений x , y и z с максимальным горизонтальным главным напряжением, минимальным горизонтальным главным напряжением и вертикальным главным напряжением соответственно определяются непроницаемые границы модели. Модель ограничена путем применения направленных смещений, что обеспечивает точное представление условий напряжения на месте и предотвращает переток жидкости через границы.

На основе данных на месте целевого резервуара выбираются репрезентативные параметры модели. Пример эталонного расчета фокусируется на одиночном гидроразрыве, предполагая, что мощность пласта составляет 3 м. Параметр впрыска включает скорость вытеснения 18 м³/мин и общее время впрыска 3600 с. Напряженные условия на месте характеризуются минимальным горизонтальным напряжением 98 МПа, максимальным горизонтальным напряжением 116 МПа и вертикальным напряжением 112 МПа. Начальное поровое давление установлено на уровне 90 МПа. Кроме того, остальные параметры материала породы получены на основе данных механических испытаний сланцевых пород, полученных из блока Lu214 в бассейне Сычуань (как подробно описано в Таблице 1).

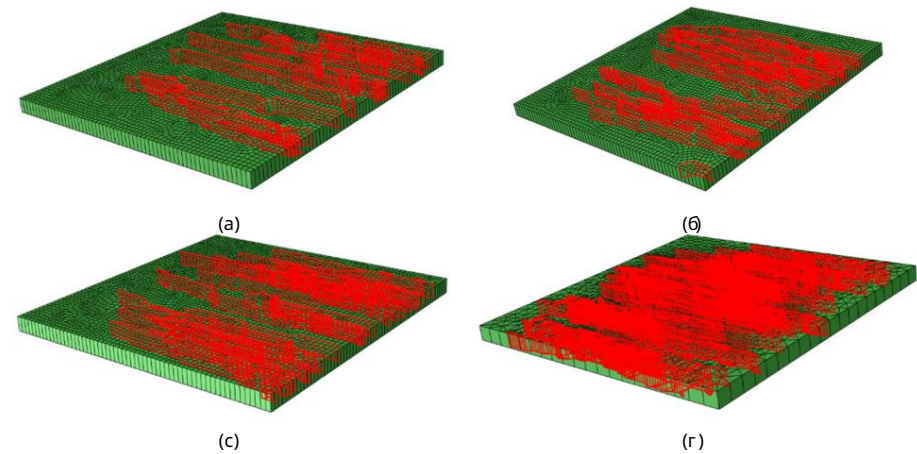


Рисунок 2. Принципиальная схема моделей FDEM с естественными трещинами: (а) 20 естественных трещин; (б) 30 естественных трещин; (в) 40 естественных трещин; (д) 50 естественных трещин.

Таблица 1. Основные параметры, используемые в имитационных моделях.

Входные параметры	Ценить
Модуль Юнга (ГПа)	40
коэффициент Пуассона	0,22
Коэффициент проницаемости (м/с)	1×10^{-7}

Пористость	0,04
Предел прочности естественных изломов (МПа)	2
Смещение критического повреждения естественных трещин (м)	0,0001
Предел прочности матричных сопряжений (МПа)	6
Смещение критического повреждения матричных интерфейсов (м)	0,001
Скорость впрыска (м3/мин)	19-20
Вязкость жидкости гидроразрыва (МПа·с)	1
Шероховатость трубы(мм)	0,015 × 10-3
Диаметр перфорации (м)	0,01

3. Результаты анализа 3.1.

Влияние количества кластеров трещиноватости

Для исследования поведения многокластерного трещиноватости в пластовых условиях на целевой территории сначала сравнивались результаты распространения трещины под разными номерами кластеров, результаты анализа рисунка 3. С увеличением расстояния между кластерами результаты моделирования гидроразрыва разного количества кластеров демонстрирует разные характеристики распространения трещин. По мере увеличения количества кластеров количество элементов трещин и общая площадь имеют тенденцию увеличению. Однако от однокластерной трещиноватости к трещиноватости увеличением количества и площади трещин от носителя но невелико. Это указывает на то, что по мере увеличения числа кластеров на распространение трещин влияют межкластерные взаимодействия. При этом по мере увеличения межкластерного расстояния и увеличения количества кластеров наблюдается уменьшение объема трещины. Интересно, что доля разрушений при растяжении в сети трещин значительно увеличивается. Это явление предполагает, что при единичном кластерном разрыве возникнут проблемы с созданием крупномасштабных трещин. Закачиваемая жидкость в основном используется для создания и удлинения трещин. Напротив, многокластерный гидроразрыв облегчает развитие более сложной сети трещин и увеличивает общий объем трещин. Эти наблюдения подчеркивают влияние конфигурации кластеров на морфологию трещин и подчеркивают потенциальные преимущества использования стратегий мультикластерного гидроразрыва для оптимизации стимуляции пласта и повышения нефтеотдачи углеводородов.

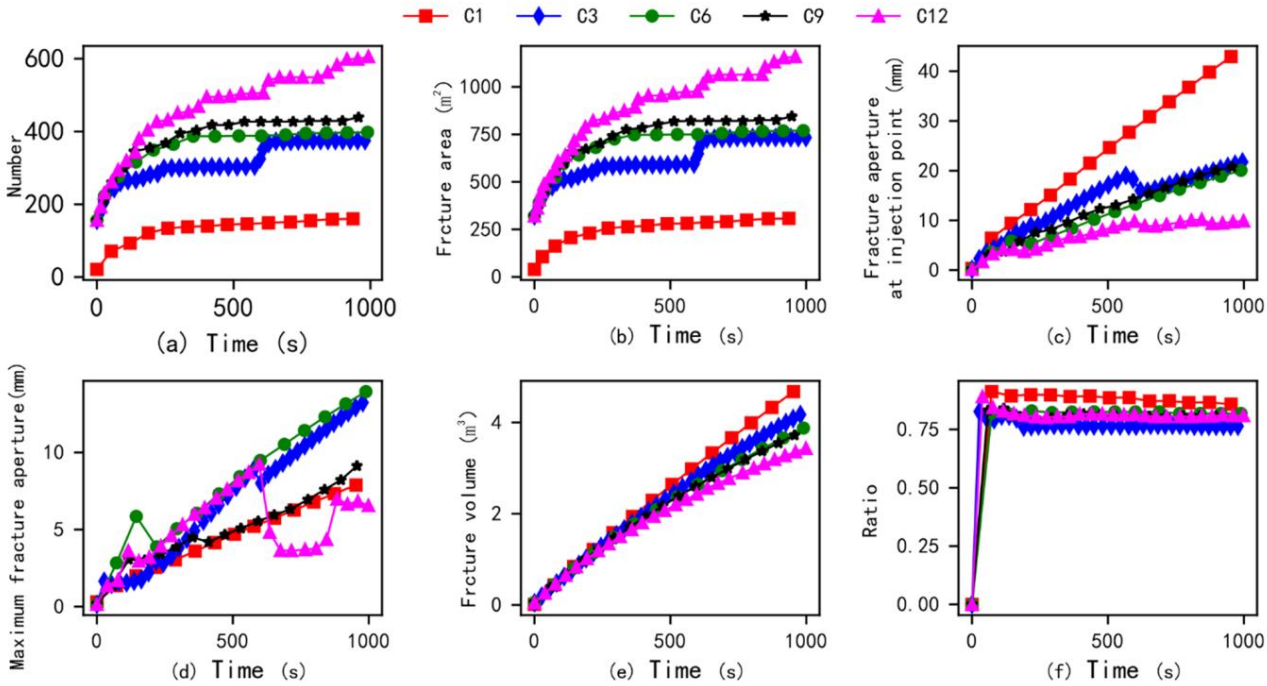


Рисунок 3. Результаты радиационных количественных показателей при различных конфигурациях кластеров (а) количество поврежденных элементов интерфейса в зависимости от времени; (б) площадь трещины в зависимости от времени; (в) апертур трещины в точках кривизны в зависимости от времени; (г) максимальная трещина апертур в зависимости от времени; (е) объем трещины в зависимости от времени; и (ф) соотношение разрушения при растжении в зависимости от времени) (C1, C3, C6, C9 и C12 относясь к сценариям разрыва, включающим 1 кластер, 3 кластера, 6 кластеров, 9 кластеров, и 12 кластеров соответственно).

При времени моделирования 1000 с окончательное распределение трещин показано на рисунке 4.

Примечательно, что по мере увеличения количества кластеров расстояние между кластерами в модели уменьшается. Следовательно, общая площадь поверхности, покрытой искусственными трещинами, увеличивается, тогда как апертур трещин, исходящих из точки нагнетания, уменьшается. Это отрывает из себя то, что с увеличением количества скоплений трещиноватости и площадь трещин среднего давления в пласт расширяется. Однако, поскольку общий объем закиси остается постоянным, наблюдается небольшая тенденция к уменьшению апертур трещины. Кроме того, уменьшается общий объем видимых трещин. Эти наблюдения позволяют предположить, что вариации количества кластеров и расстояния между кластерами влияют на морфологию трещин. Модель имеет тенденцию создавать больше количества более мелких трещин под влиянием комбинации факторов, включая сетку модели, наличие естественных трещин, количество кластеров трещин и геонапряженные условия. Это приводит к увеличению общей площади поверхности трещины и уменьшению видимого объема трещины. Такое поведение подчеркивает сложное взаимодействие между параметрами трещиноватости и конечной геометрией сети трещин.

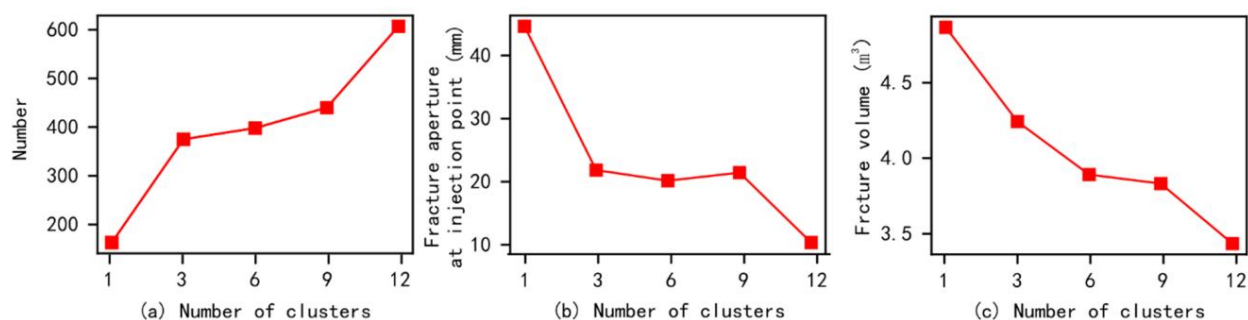
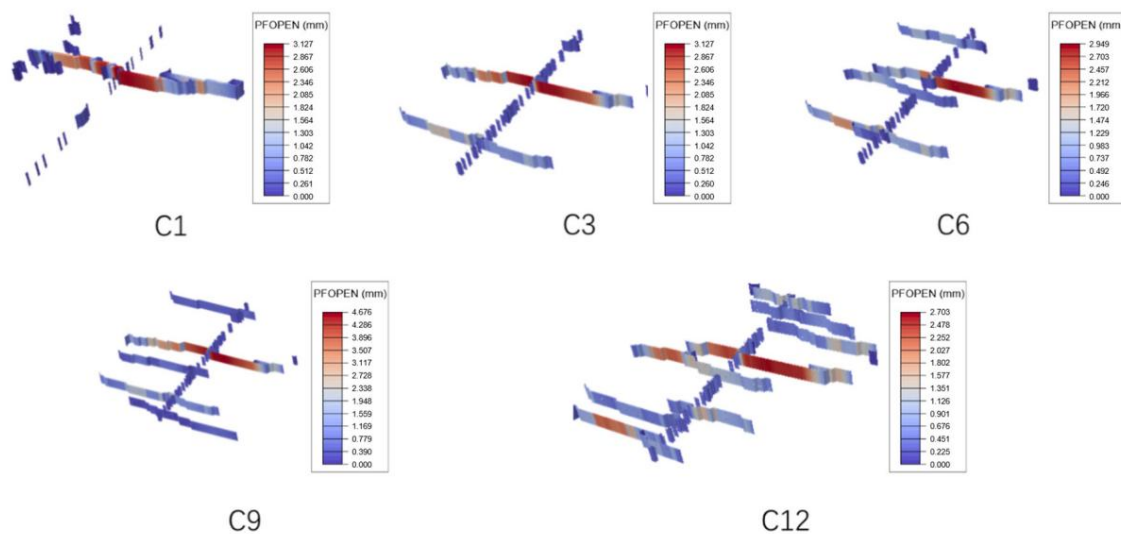


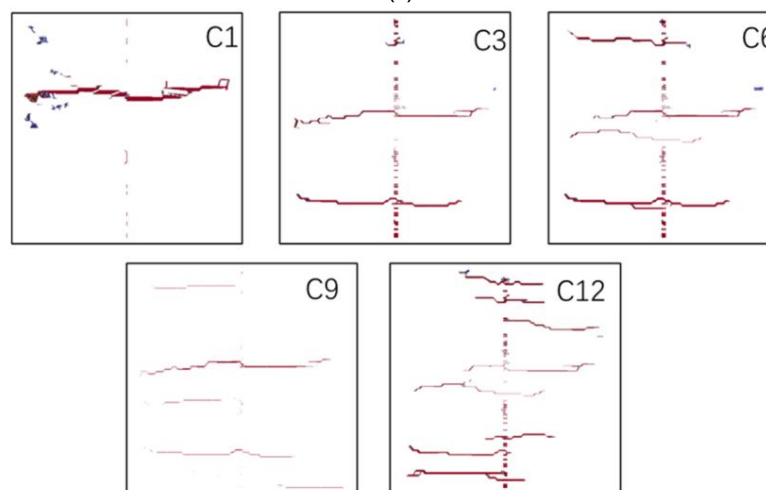
Рисунок 4. Результаты радиационных параметров вантования (а) количество поврежденных элементов интерфейса в зависимости от количества кластеров трещин; (б) апертур трещины в точках кривизны в зависимости от количества кластеров трещин; и (в) объем трещины в зависимости от количества кластеров трещин) (1000 с).

На рисунке 5 представлен сравнительный анализ окончательной морфологии искусственных трещин, образовавшихся при различных конфигурациях кластеров, включая различные количества кластеров и расстояния между кластерами. При монокластерном ГРП преимущественно формируется одиночная доминирующая трещина с ограниченным зарождением и распространением трещины прибойной зоной. Однако по мере увеличения числа кластеров до трех наблюдается развитие трех первичных трещин, демонстрирующих как одностороннее, так и двустороннее распространение. Это предполагает, что увеличение количества кластеров может стимулировать образование трещин вблизи истока скважины способствовать развитию множества основных трещин, повышая общую сложность трещины. При использовании шести кластеров ГРП вблизи истока скважины появились множественные трещины. Когда число кластеров увеличивается до девяти, одновременно инициируется больше трещин. Стоит отметить, что морфология трещин была увеличена в 10 раз в результате моделирования, что обуславливает большее количество искусственных трещин. Однако основной путь трещин в кластере более очевиден, тогда как в кластере 9 наблюдается прерывистый основной путь, что указывает на наличие множества локально мелких расклевывающихся трещин, что не способствует транспортировке пропантов и последующей добыче полезных ископаемых. В прибойной зоне 12-кластерной трещины проросли более 12 искусственных трещин. По мере развития процесса разрыва конуренция усиливается, в результате чего некое количество вновь образовавшихся трещин не расклевываются дальше, что в конечном итоге приводит к расширению 10 основных трещин. Приведенные выше результаты указывают, что чем больше кластеров трещиноватости, тем

меньше расстояние между кластерами, что обычно значительно увеличивает объем искусственных трещин, тем самым повышая эффективность трансформации пласта. Аналогичные выводы можно сделать и в некоторых исследованиях по методам наземного мониторинга землетрясений [37–37]. 41]. Например, Чен и др. В ходе микросейсмического мониторинга резервуаров сланцевого газа в юго-западном регионе было обнаружено, что увеличение числа кластеров трещиноватости может способствовать возникновению большего количества микросейсмических событий, а точнее микросейсмических событий вблизи ствол скважины постепенно собираются в несколько полос, что указывает на возможность создания большего количества искусственных переломов. В то же время они также обнаружили, что под воздействием естественных трещин и других факторов многие микросейсмические события могут возникать в районах, удаленных от ствола скважины, что существенно в результатах расширения трещиноватости отдельного кластера на рисунке 5. Стоит отметить, что по сравнению 3D-видом на виде сверху вид на толщю кластер основной формы шва. Очевидно, это связано с тем, что некоторые трещины откряются слишком мало. Следовательно, увеличение количества кластеров не обязательно приводит к пропорциональному увеличению количества основных трещин. Крайне важно учитывать влияние размера проппанта на эффективное количество поддерживаемых трещин. Размер проппанта играет важную роль в определении раскрытия и проводимости трещин, что в конечном итоге влияет на общую эффективность процедуры гидроразрыва. Оптимизируя размер проппанта в соответствии с пластовыми условиями гидроразрыва, можно максимизировать количество эффективно поддерживаемых трещин и повысить добычу углеводородов.



(a)



(b)

Рис. 5. Результат сравнения морфологии искусственных трещин под разными номерами кластеров (а) 3D-вид и вид сверху (б) (C1, C3, C6, C9 и C12 относя к сценария МГРПС соответственно 1 кластера, 3 кластера, 6 кластера, 9 кластера и 12 кластера соответственно).

3.2. Влияние количества естественных переломов

Распределение естественных трещин играет решающую роль в влиянии на эффективность гидроразрыва пласта. Поэтому в этом разделе был проведен симуляционный анализ для изучения влияния различного количества естественных трещин на моделируемый целевой блок. По промышленным данным, полученным на целевом блоке, линейная плотность естественных трещин внутри блока попадает примерно в диапазон от 0,3 до 0,8. Учитывая смоделированную площадь $60 \text{ м} \times 60 \text{ м}$, количество естественных трещин в модели варьируется от 20 до 50. Полученные результаты моделирования показаны на рисунке 6.

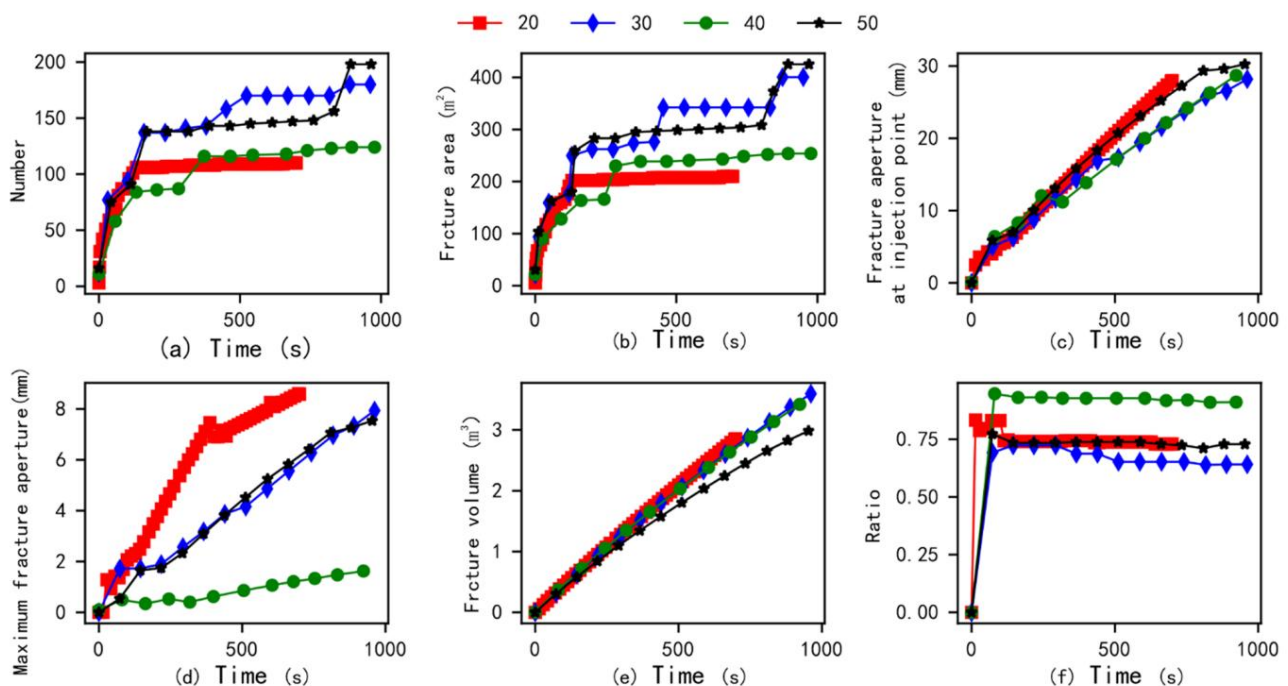
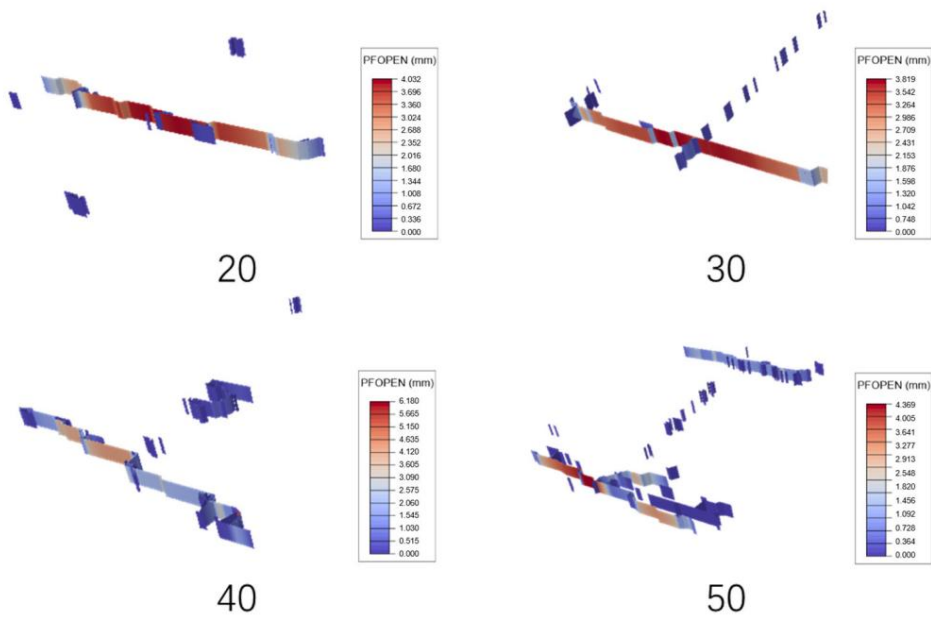


Рисунок 6. Результаты радиационных количественных показателей под влиянием количества естественных трещин (а) количество поврежденных элементов интерфейса в зависимости от времени; (б) площадь трещины в зависимости от времени; (в) апертур трещины в точках закачки в зависимости от времени; (г) максимальная апертур трещины в зависимости от времени; (е) объем трещины в зависимости от времени и (ф) соотношение разрушения при растаивании в зависимости от времени) (числа (20, 30, 40, 50) обозначают количество естественных трещин в различных имитационных моделях x).

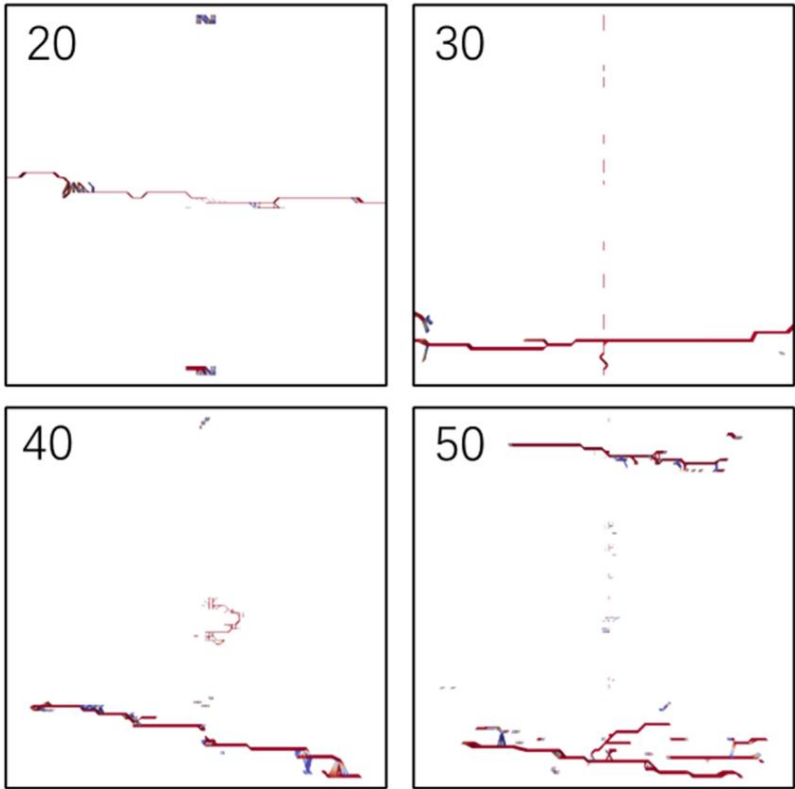
На рисунке 6 показано, что с увеличением плотности трещин количество элементов трещин и общая площадь трещин имеют тенденцию к увеличению. Между тем, апертур и объем трещин, похоже, демонстрируют определенную тенденцию к уменьшению. Это может быть связано с повышенной плотностью естественных трещин, что делает гидроразрыв пласта более восприимчивым к влиянию трещин, что приводит к образованию множества малорасходящихся сдвиговых трещин. Следовательно, с увеличением естественных трещиноватости сдвиговые трещины возникают в результате сдвиговой стимуляции, значительно увеличиваясь, а площадь трещины увеличивается. В то же время, поскольку сдвиговые трещины представляют собой преимущественно малорасходящиеся трещины, видимый объем искусственных трещин демонстрирует определенные колебания и тенденцию к уменьшению.

Рисунок 7 иллюстрирует раскрытие искусственных трещин в коллекторах под воздействием различной плотности естественных трещин. Как показано на рисунке, с увеличением естественных трещин количество искусственных трещин в пласте значительно увеличивается, проявляясь больше ответвлений и расширений искусственных трещин. Одновременно с этим увеличение естественных трещин приводит к увеличению вероятности образования крупных раскрытий в искусственных трещинах вблизи створов пластовой скважины. Кроме того, когда количество естественных трещин увеличивается до

в определенной степени это может вызвать образование одиночных кластеров трещин с образованием многокластерной протяженной искусственной сети трещин. Приведенные выше результаты показывают, что естественные трещины оказывают существенное влияние на развитие искусственных трещин во время гидроразрыва пласта, что может изменить положение основных трещин, распределение трещин вблизи истощающей скважины, а также морфологию изгиба и ветвления основных трещин. Тем самым вызывая образование сложной сети трещин и повышая эффективность гидроразрыва пласта.



(a)



(b)

Рис. 7. Результаты морфологии искусственных трещин в коллекторах под воздействием различных номеров естественных трещин (а – 3D вид, (б) – вид сверху) (цифры (20, 30, 40, 50)) представлят количество естественных трещин в различных имитационных моделях).

3.3. Комплексный анализ воздействия

Результаты предыдущих исследований показывают, что как количество кластеров трещиноватости, так и количество естественных трещин существенно влияют на характер распространения искусственных трещин в пластах [26,27]. Средних количество естественных трещин обычно варьируется внутренним составом пласта, которое трудно изменить с помощью методов строительства, тогда как количество кластеров трещин варьируется методом строительства, которое можно напрямую регулировать во время строительства на месте. Если использовать разные кластерные гидроразрывы для участков с разными естественными трещинами, это может еще больше повысить эффективность трансформации коллектора. Таким образом, для дальнейшего обсуждения комплексного влияния конструкции МГРП и естественных трещин в этом разделе все сценарии сравниваются и моделируются распространение трещин МГРП в целевых областях коллектора с различным количеством естественных трещин.

На рисунке 8 наблюдается влияние неполного расчета результатов ГРП шести кластеров. Поэтому анализ основан только на результатах ГРП трех идеальных кластеров. Судя по приведенному выше рисунку, когда плотность трещин равна 20, многокластерный гидроразрыв не обязательно увеличивает площадь трещин пласта, но оказывает значительное влияние на объем трещин пласта. Это влияние отнесено к различному поведению искусственных трещин внутри пласта, в данном случае наличие естественных трещин. Примечательно, что наличие естественных трещин часто приводит к дальнейшему увеличению имитированного объема пласта (CPV). Это наблюдение подчеркивает важность рассмотрения взаимодействия между естественными трещинами и операциями гидроразрыва.

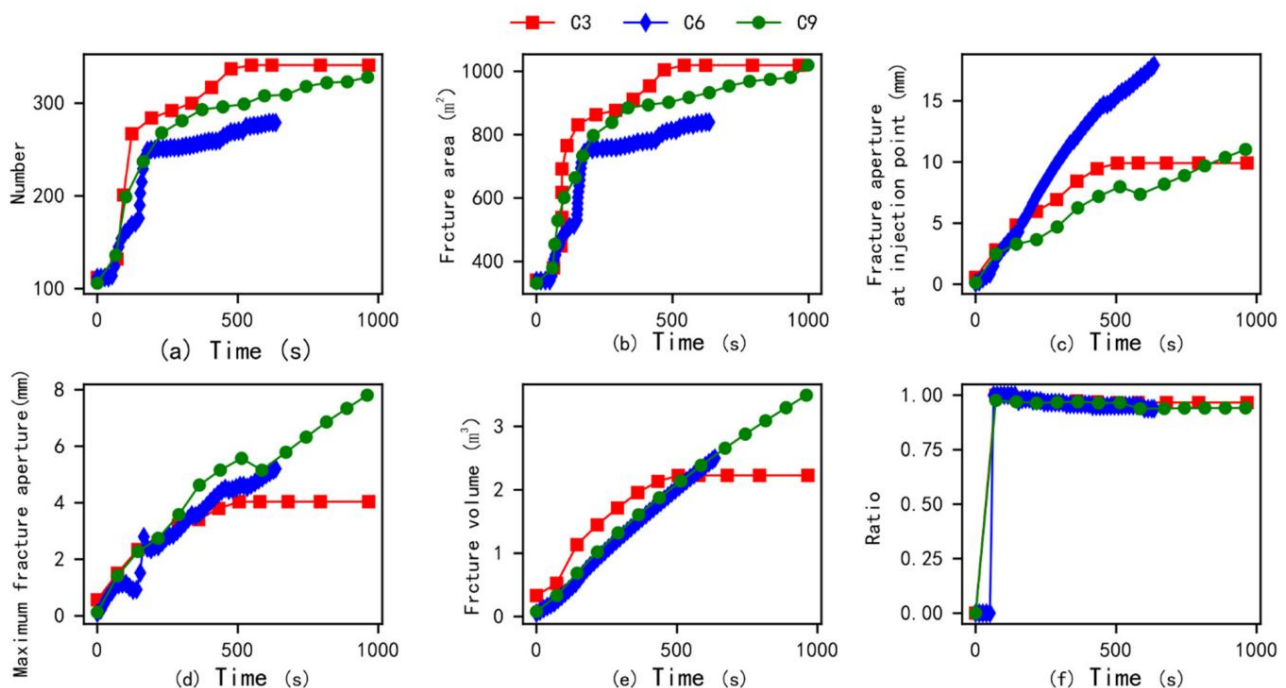


Рисунок 8. Результаты радиационных количеств трещин при различных конфигурациях кластеров, когда в регионе имеется 20 естественных трещин (а) количество поврежденных элементов интерфейса в зависимости от времени; (б) площадь трещины в зависимости от времени; (в) апертур трещины в точке закачки в зависимости от времени (д) максимальная апертур трещины в зависимости от времени; (е) объем трещины в зависимости от времени и (ф) соотношение разрушения при растяжении в зависимости от времени (C3, C6 и C9 соответствуют сценариям разрушения, включая 3 кластера, 6 кластеров и 9 кластеров; соответственно).

На рисунке 9 можно заметить, что в этой имитационной модели наблюдалось три основных расширения трещин в трех кластерах трещиноватости, шесть основных расширений трещин в шести кластерах трещиноватости, а также две основные трещины локальные сложные расширения сети трещин в девяти группах трещиноватости. Это результат предполагает, что с увеличением количества кластеров трещиноватости в коллекторе с большей вероятностью образуется сложная сеть трещин. Между тем, из результатов, представленных на приведенном выше рисунке, нетрудно заметить, что двумерное представление результатов девяти кластерного разрыва не имеет существенного значения, поскольку существует множество трещин с низким раскрытием. При рассмотрении раскрытия трещины результат ИГРП кластера 6 существенно лучше, чем у кластера 3 и кластера 9.

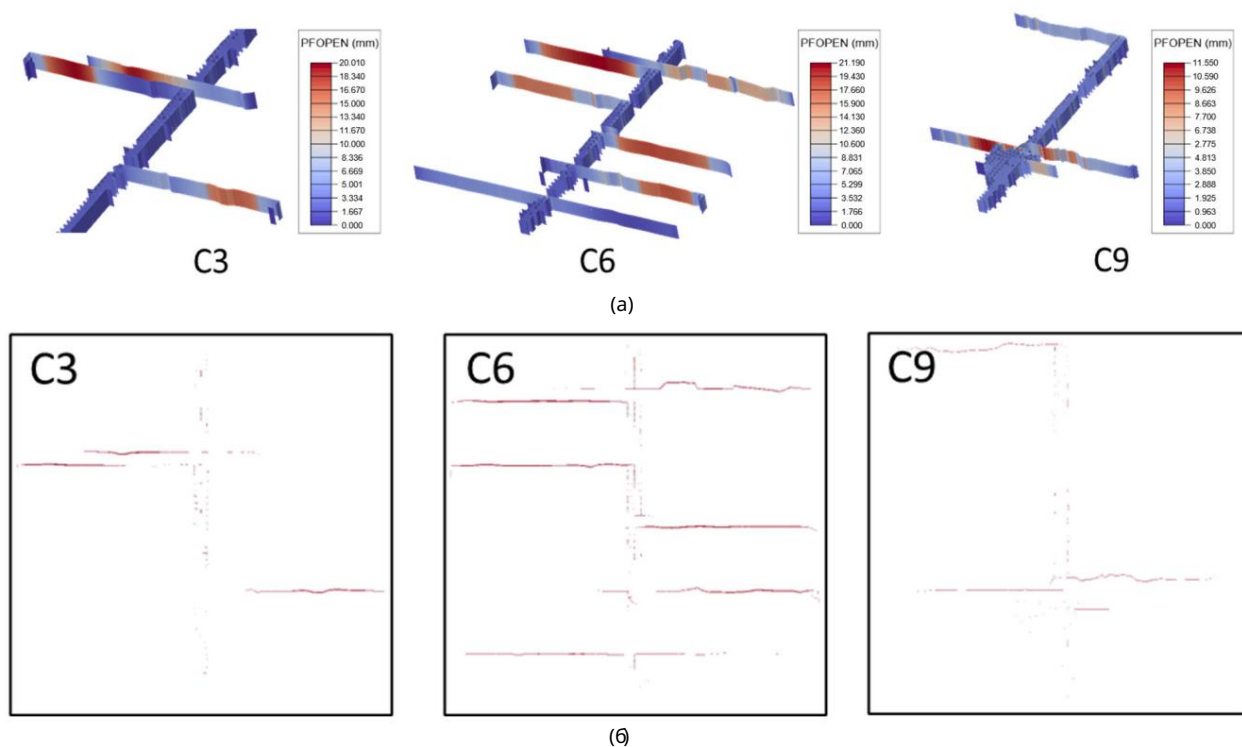


Рисунок 9. Морфология трещины при различных сценариях кластерного трещиноватости, когда в регионе имеется 20 естественных трещин (а) — трехмерный вид и (б) — вид сверху (C3, C6 и C9 соответствуют сценариям трещиноватости, включающим 3 кластера, 6 кластеров и 9 кластеров соответственно).

На рисунке 10 представлены сравнительные результаты радиационных количественных показателей для различных конфигураций кластеров при наличии 30 значительных естественных трещин в интересующем регионе. По сравнению с результатами моделирования с плотностью трещин 20, моделирование 1, 3, 6, 9 и 12 кластеров было полностью согласовано с плотностью трещин 30. Таким образом, результаты для разных кластеров с плотностью трещин 30 были дополнены извлечены. Судя по приведенному выше рисунку, по мере увеличения количества кластеров трещин площадь искусственной трещины раскрытия трещины коэффициент разрушения пласта при сдвиге значительно увеличиваются.

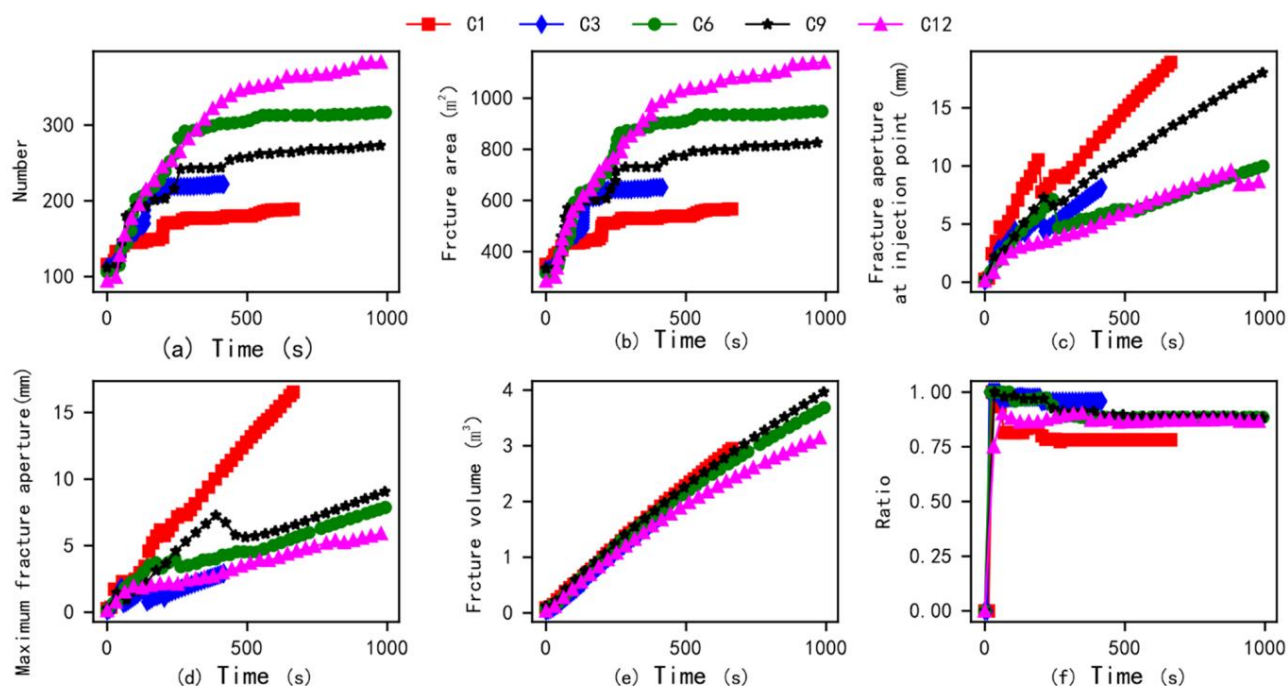
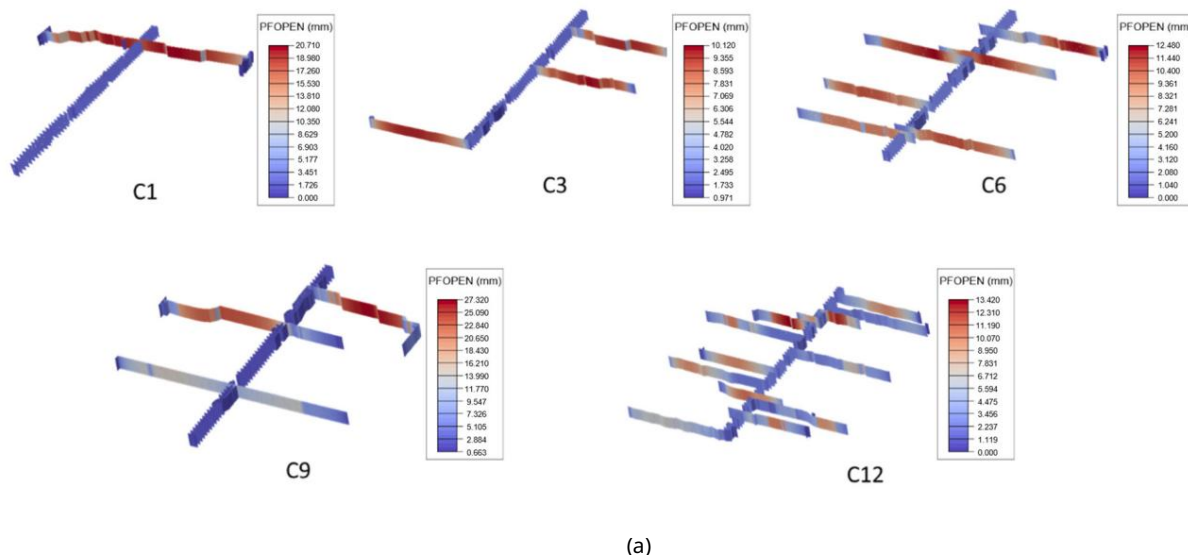
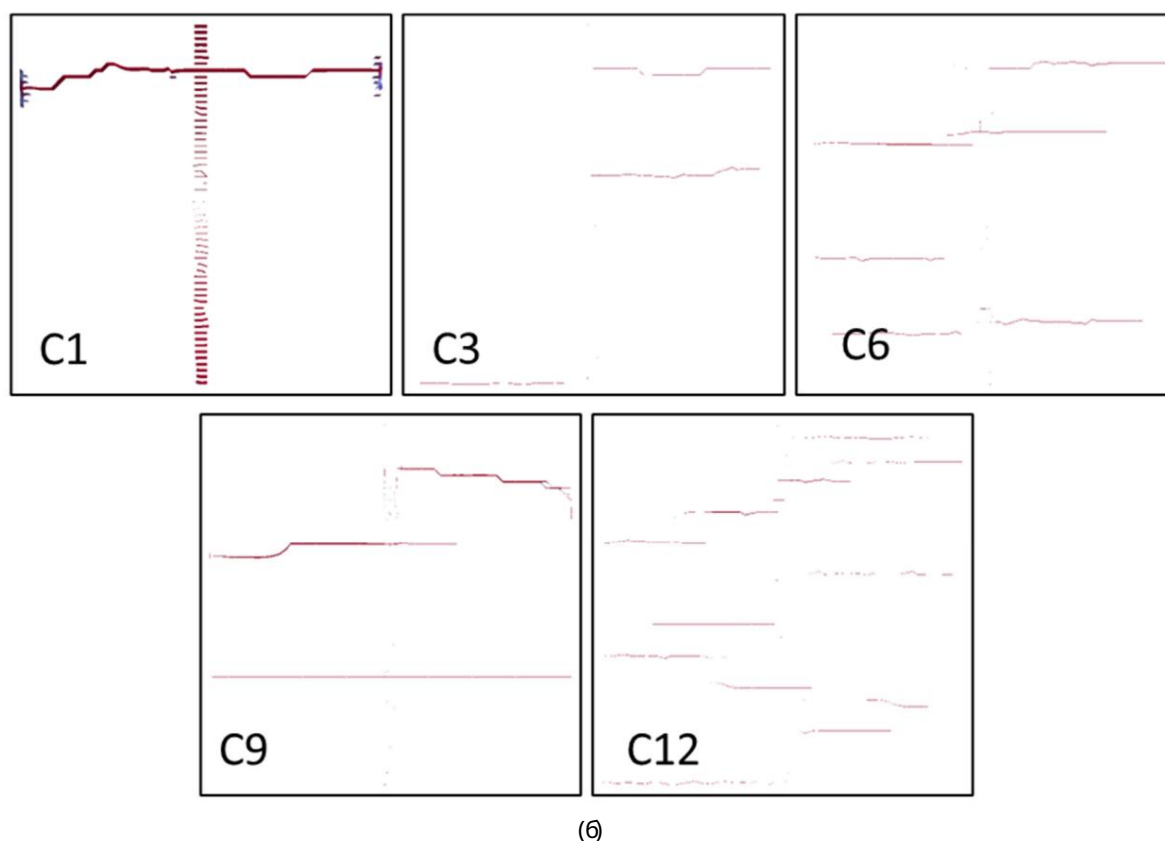


Рис. 10. Результаты сравнения условных количественных параметров под влиянием различных кластеров при наличии в регионе 30 естественных трещин (а – количество поврежденных элементов интерфейса в зависимости от времени; б – площадь трещины в зависимости от времени; в – раскрытие трещины в точке инъекции в зависимости от времени; (д) максимальная апертура трещины в зависимости от времени; (е) объем трещины в зависимости от времени и (ф) соотношение разрушения при растяжении в зависимости от времени) (C1, C3, C6, C9 и C12 представляют сценарии разрыва, включающие 1); кластер 3 кластера, 6 кластеров, 9 кластеров и 12 кластеров соответственно).

Процесс изменения морфологии трещин, когда число трещин достигает 30, показан на рисунке 11. По мере увеличения количества кластеров трещин, основные искусственные трещины в пласте демонстрируют тенденцию к увеличению. К сожалению при гидроразрыве 1 кластера образовалась 1 основная трещина, при гидроразрыве 3 кластеров образовалось 3 основные трещины при гидроразрыве 6 кластеров образовалось 6 основных трещин, а при гидроразрыве 12 кластеров образовалось 12 основных трещин. Однако при разрушении девяти кластеров образовались только три основные трещины. Мы предполагаем, что это связано с большим количеством трещин вблизи ствола скважины генерируемых в имитационной модели девяти кластерного ГРП, что указывает на то, что реализация девяти кластерного ГРП в условиях данной модели затруднит достижение экономичного результата. Эффекты разрушения.





(б)

Рисунок 11. Морфология тещины при различных сценариях кластерного тещинообразования, когда в регионе имеется 30 естественных тещин ((а) — трехмерный вид и (б) — вид сверху) (C1, C3, C6, C9 и C12 представляют сценарии тещинообразования с участием 1 кластера, 3 кластеров, 6 кластеров, 9 кластеров и 12 кластеров соответственно).

На рисунке 12 представлен сравнительный анализ традиционных количественных показателей для различных конфигураций кластеров при наличии 40 естественных тещин в интересующем регионе. По сравнению с результатами моделирования, полученными при плотности тещин 20, комплексное моделирование было проведено для 1 кластера, 3 кластеров, 6 кластеров, 9 кластеров и 12 кластеров при плотности тещин 40. Затем было проведено тщательное сравнение объемных параметров для различных конфигураций кластера. Как видно из графического представления результатов, площадь искусственной тещины, апертур тещины и коэффициент разрушения при сдвиге в пласте демонстрируют заметную тенденцию увеличения с увеличением количества кластеров тещинообразования. Эти наблюдения подтверждают значительное влияние конфигурации кластеров на развитие тещин и дают ценную информацию для оптимизации стратегий гидроразрыва с целью улучшения интенсификации пласта и добычи углеводородов.

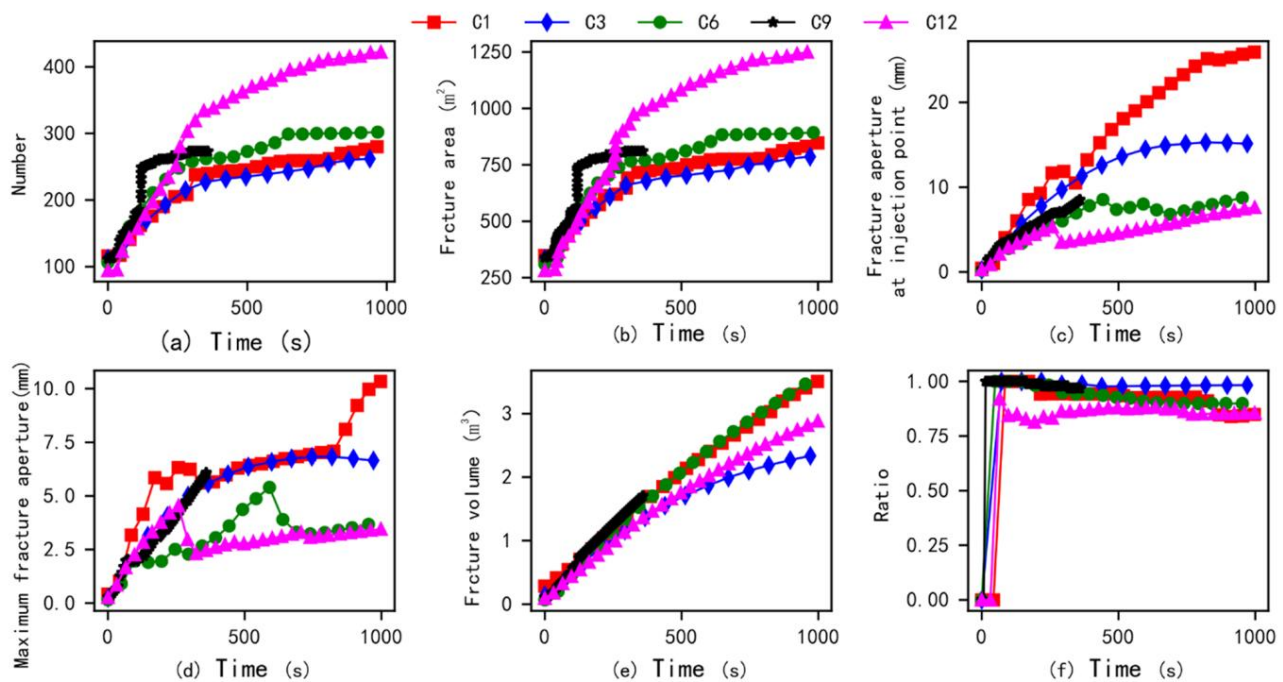


Рис. 12. Сравнительные результаты экспериментальных исследований при различных конфигурациях кластеров при наличии 40 естественных трещин в пределах региона ((а) количество поврежденных элементов интерфейса в зависимости от времени; (б) площадь разрушения в зависимости от времени; (в) апертур трещины в точке инъекции в зависимости от времени; (д) максимальная апертур трещины в зависимости от времени; (е) объем трещины в зависимости от времени и (ф) соотношение разрушения при разрыве в зависимости от времени) (C1, C3, C6, C9 и C12 представляют собой трещиноватость); сценарии с участием 1 кластера, 3 кластеров, 6 кластеров, 9 кластеров и 12 кластеров соответственно).

Рисунок 13 иллюстрирует эволюцию морфологии трещин с различной конфигурацией кластеров трещин при плотности трещин 40. Как показано на рисунке, количество первичных искусственных трещин в пласте постепенно увеличивается по мере роста количества кластеров трещин. Это наблюдение подчеркивает влияние конфигурации кластеров на развитие трещин и потенциальную оптимизацию стратегий гидроразрыва для повышения интенсификации пласта и добычи углеводородов. Среди них был феномен разветвления множества основных трещин во время разрыва кластера 1, что указывает на то, что разрыв одного кластера может также создать локальную искусственную сеть основных трещин. При разрушении трех кластеров образовалась сеть основных трещин. При уменьшении степени расширения магистральных трещин образовалось 5 основных трещин при ГРП 6 кластеров, 3 магистральных трещины области расширения локальной сети трещин при ГРП 9 скоплений и 12 магистральных трещин при ГРП 12 кластеры. Результаты указывают, что по мере увеличения количества кластеров трещиноватости увеличивается и количество искусственных магистральных трещин. Стоит отметить, что результаты предыдущих исследований показали, что по мере увеличения плотности естественных трещин искусственные трещины могут проявлять больше изгибов, разветвлений и других явлений расширения, образуя сложную сеть трещин [42,43]. Сравнивая результаты моделирования при различных количествах естественных трещин и кластеров в этом разрезе, по мере увеличения количества естественных трещин искусственные трещины могут стать более сложными. Например, когда смоделированный целевой блок содержит 40 естественных трещин, даже в условиях однокластерной трещиноватости формируются более сложные формы трещин. Между тем, когда смоделированный целевой блок содержит 20 естественных трещин, даже в условиях трещиноватости девяти кластеров может быть сложно сформировать сложную

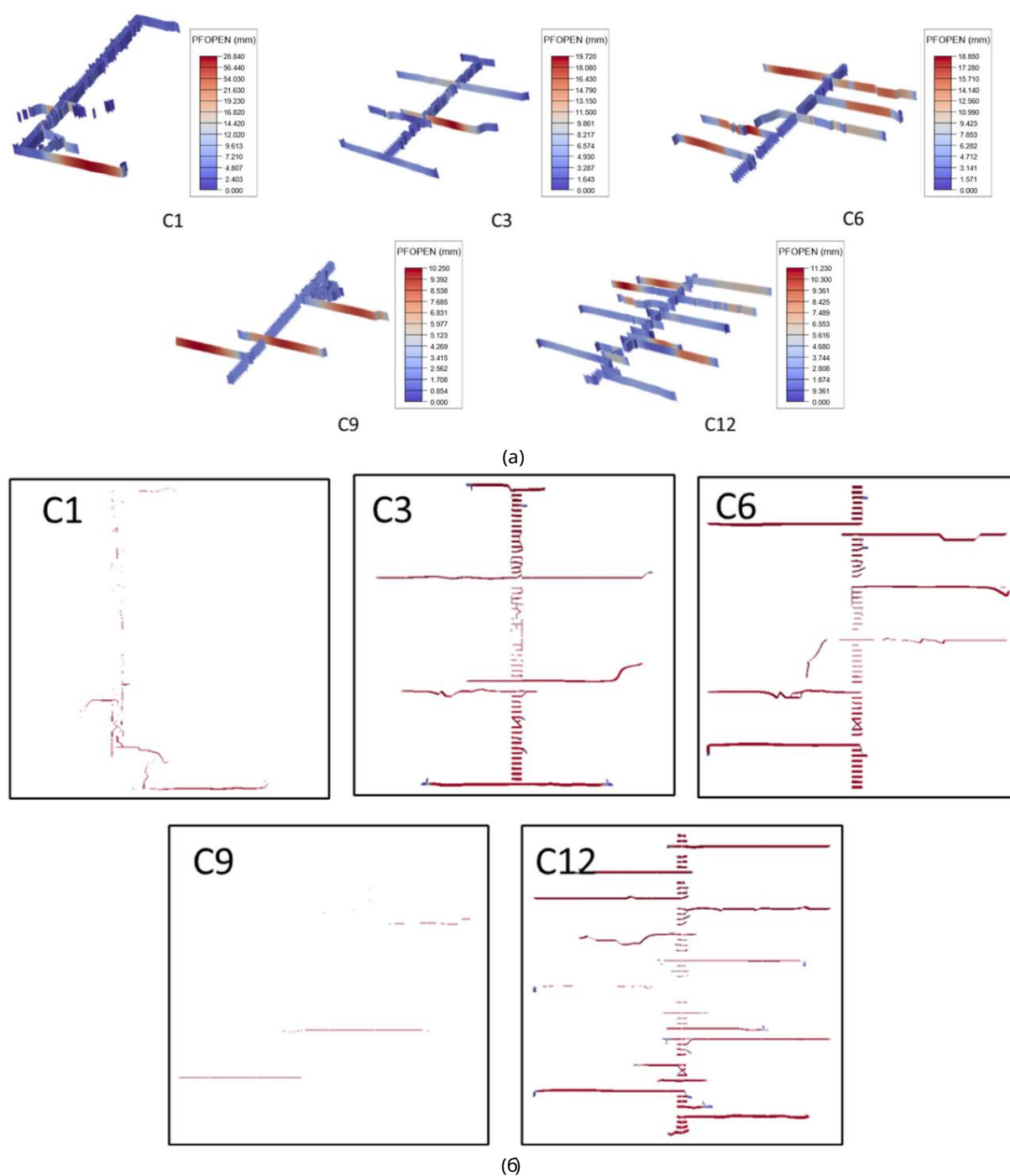


Рисунок 13. Морфология трещин при различных сценариях кластерного трещиноватостного, когда в регионе имеется 40 естественных трещин ((a) — трехмерный вид и (b) — вид сверху) (C1, C3, C6, C9 и C12 представляют сценарии трещиноватости с учетом 1 кластера, 3 кластеров, 6 кластеров, 9 кластеров и 12 кластеров соответственно).

4. Выводы

На основе FDEM и данных на месте по определенному блоку скважин на юго-западе Китая были созданы модели множественного кластерного гидроразрыва с учетом естественных трещин и геолого-механических параметров целевого блока. Выявлены изменения площади искусственной трещины, апертур, трещины, объема трещины, давления жидкости и морфологии трещины в результатах моделирования, а также влияние количества кластеров трещиноватости и количества естественных трещин в целевом блоке на анализированное образование искусственных переломов. Основные выводы заключаются в следующем:

- (1) По мере увеличения количества кластеров трещиноватости количество искусственных магистральных трещин, образовавшихся в целевом блоке, демонстрирует значительную тенденцию увеличения. Однако под влиянием распределения естественных трещин, геонапряжений и других факторов также может быть затруднительно сформировать множественные основные трещины посредством многокластерного разрыва в целевом блоке (Рисунок 9). Следовательно, получение данных о пространственном расположении и ориентации естественных трещин может быть более полезным для точной оценки эффекта трещиноватости в целевом блоке.
- (2) Из-за влияния исходной случайной трещиноватости и естественных трещин пластасклонных возникновений сдвиговой симуляции. В этих условиях искусственные трещины пластасклонных изгибов, разветвления и других явления. При дальнейшем воздействии нескольких их методов строительная искусственная основная трещина будет более склонна к одностороннему расширению, а не двустороннему расширению.
- (3) Конструкция многокластерного ГРП может способствовать увеличению и искусственных трещин, но при этом же объеме закачки и пертурбации искусственных трещин уменьшится. Следовательно, соответствующее увеличение скорости закачки и во время строительная несколько их кластеров будет более способствовать закачке пропантов и других материалов.
- (4) Увеличение количества естественных трещин в целевом блоке поможет получить более сложную сеть искусственных трещин. Когда количество естественных трещин достигнет определенного порога, даже использование процесса построения однокластерного разрыва может образовать искусственную сеть трещин, соединяющую несколько из основных трещин.

Вклад авторов: Концептуализация, YL и YG; курирование данных, YG; приобретение финансирования, JL; расследование, YL, MW, HH, YG, YW и JL; методология, MBT; администрирование проекта, YL, HH и YG; ресурсы DX и JG; надзор, YL, HH, YW и JG; письменность – первоначальный вариант, MBT; написание — рецензирование и редактирование, YL и HH. Все авторы прочитали опубликованную версию рукописи и согласились с ней.

Финансирование: Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку от китайского исследовательского фонда Государственной ключевой лаборатории геомеханики и геотехники Института механики и горных пород и Геотехнической академии наук, грант № SKLGM022020. Между тем, эта статья финансируется за счет научнотехнического специального проекта PetroChina Co., Ltd. под названием «Исследования по крупномасштабному увеличению запасов, увеличению добычи, а также технологий разведки и разработки сланцевого газа» (№ 1). 2023Z214).

Заявление об этической стороне наблюдения: не применимо.

Заявление об информированном согласии: не применимо.

Заявление об ответственности и данных: Исходные данные и код, подтверждающие выводы статьи, будут предоставлены авторами по запросу.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Ву, М.; Лю Дж.; Лю В, Х.; Ши, Д.; Чжу, З. Исследование уравнений гомогенизации фрактальных пористых сред. Дж. Геофиз. англ. 2018, 15, 2388–2398.

2. Чжэн Ю. Е.; Хуанг, Л.; Бай, Ю Ван, К.; Чен, В.; Ван, В. Исследование влияния инженерных параметров на проникновение трещин гидроразрыва через плоскости напластования при различных режимах распространения. Выходит. Геотех. 2022, 146, 104736.

3. Лю К.; Ли, Дж.; Ли, Б.; Лю Дж.; Сан, В.; Он, Дж.; Лей, Ю. Механизм запуска сложного поведения смазываемости и пропитки: А построение моделей и сравнительное исследование на основе анализа в нескольких масштабах. Энергия 2023, 275, 127434.

4. Сонг, Р.; Лю Дж.; Кю, М. Новый метод реконструкции модели сетки пористого изображения микроромбической черной томографии. Пористые среды их применение. Между. J. Теплообмен. 2017, 109, 705–715.

5. Ван Л.; Чжоу, Дж.; Го, Ю. Песня, Х.; Го, В. Лабораторные исследования и оценка гидроразрыва морских пластов сланцев с учетом множества геологических и инженерных факторов. Передний. Наук и о Земле. 2022, 10, 952655.

6. Чжан Х.; Чен, Дж.; Ли, З.; Хм; Мэй, Ю. Численное моделирование многокластерного гидроразрыва с использованием зависимости от трещиноватости. Модель зонирования в сланцевом коллекторе с минеральной неоднородностью. Рок. Мех. Рок. англ. 2023, 57, 325–349.

7. Нгуен, ХТ; Ли, Дж. Х.; Элрайес, К. А. Обсуждение моделирования гидроразрыва типа PKN. Дж. Пет. наук. англ. 2020, 195, 107607.

8. Тис, СН; Венг, К. Глава 1. ГРП ст вола ск важины 2D-мод елит рещин. В механик е г ид рораз рыва пласт а, 2-е из д.; Gulf Professional Publishing: Бост он, Массач усет с, США, 2015 г.; ст р. 1-22.

9. Донц ов Е. В.; Пирс, А.П. Т ранспорт ировк а пропант а при г ид рораз рыве пласт а: филь т рац ия вершин т рещин в мод еля х KGD и P3D. Межд. Дж. Ст рук т ура т вердых т ел. 2015, 63, 206-218.

10. Сант иль я н, Д.; Хуанес, Р.; Куэ т о-Фель геросо, Л. Модель фазового поля г ид род инамич еск ого разрушения в упруг их сред ах: пог руженный раз рыв формулировк а и проверк а с помощь ю аналит ич еск их решений. Дж. Геофиз. Рез. Т вердая Земля 2017, 122, 2565-2589.

11. Сонг, Р.; Лю Дж.; Ян, К.; Сан, С. Исслед ование механиз ма многофазного т епло- и массопереноса при д иссоц иац ии мет ана. г ид рат в рек онст руированных порист ых от ложения х реаль ной формы Энергия 2022, 254, 124421.

12. Сонг, Р.; Ван, Ю Ишт ов С.; Самбрано-Нарваес, Г.; Ход дер К. Дж.; Чалат урник, Р. Дж.; Солнц е, С.; Лю Дж.; Гамаге, РПА К омплек сное эк сперимент аль ное исслед ование механич еск ого поведения, мик рост рук т уры и т ранспорт ных свойств в камня, напеч ат анного на 3D-принт ере Аналоги. Рок. Мех. Рок. англ. 2020, 53, 5745-5765.

13. Го, К.; Сий, Дж.; Вэй, М.; Цз я н Р. Эк сперимент аль ное исслед ование и чис ленное мод елирование г ид рораз рыва плот ного песч аник а. резервуары Т опливо 2015, 159, 334-344.

14. Могадаси, Р.; Рост ами, А.; Хеммат и-Сарагарде, А. Применение наножидк ост ей для борь бы с миграц ией мелк их част иц в г ид равлич еск их проц ессах. раз рыв: эк сперимент аль ное исслед ование и понимание механиз ма. Адв. Геоэнергет ич еск ие ресурсы 2019, 3, 100-111.

15. Ян Р.; Ван, Ю Песня, Г.; Ши, Ю Мет оды оптимизац ии г ид рораз рыва и т ермич еск ой эк ст рак ц ии в усовершенст вованных геот ермаль ных сист емах. Адв. Геоэнергет ич еск ие ресурсы 2023, 8, 136-140.

16. Чен, Б.; Барбоза, БР; Сан, Ю Бай, Дж.; Томас, НР; Дут ко, М.; Кот т релл, М.; Ли, К. Обз ор г ид рораз рыва пласт а Мод елирование. Арх. Вын ислит ь. Мет оды англ. 2022, 29, 1-58.

17. Юань Дж.; Цз я н, Р.; Чжан В. Рабо ч ий проц есс анализ а влия ния г ид рораз рыва на гориз онт аль ную ск важину с г ид рораз рывом прои вод ст во в сист еме формирования к омпоз ит ов. Адв. Геоэнергет ич еск ие ресурсы 2018, 2, 319-342.

18. Эсфандиари, М.; Пак, А. XFEM-мод елирование влия ния пласт овых напря жений на харак т ерист ик и г ид рораз рыва и сравнение с Мод ели К ГД и ПК Н. Дж. Пет. Исслед оват ь. Прод. Технол. 2023, 13, 185-201.

19. Хуанг, Л.; Лю Дж.; Чжан, Ф.; Донц ов Е.; Дамь я нац, Б. Исслед ование влия ния прису щей горной порода неоднородност и и раз мера з ерен на г ид рораз рыв пласт а с исполь зованием диск рет но-элемент ного мод елирования. Межд. Дж. Ст рук т ура Солид са. 2019, 176-177, 207-220.

20. Хуанг, Л.; Лю Дж.; Чжан, Ф.; Фу, Х.; Чу, Х.; Дамь я нац, Б. 3D решетчат ое мод елирование иниц иирования г ид рораз рыва и приз абойной з оны ск важины распрот ранение для различ ных мод елей перфораци. Дж. Пет. наук. англ. 2020, 191, 107169.

21. Чу, Х.; Фэн, К.; Ченг, П.; Ван, Х.; Ли, С. Новая т рехмерная модель г ид рораз рыва пласт а, основанная на к онт инуум-мет од диск рет ных элемент ов. Вын ислит ь. Мет оды Прикл. Мех. англ. 2021, 383, 113887.

22. Ву, М.; Цз я н, К.; Сонг, Р.; Лю Дж.; Ли, М.; Лю Б.; Ши, Д.; Чу, З.; Дэн, Б. Сравнит ельное исслед ование г ид рораз рыва пласт а с исполь зованием различ ное диск рет ное мод елирование сет и т рещин: понимание однородных и неоднородных к олле к т оров. англ. Фрак т. Мех. 2023, 284, 109274.

23. Хуанг, Л.; Донц ов Е.; Фу, Х.; Лей, Ю Венг, Д.; Чжан Ф. Рост высот ы г ид рораз рыва в слоист ых горных породах: перспек т ива DEM-мод елирование различ ных режимов распрот ранения. Межд. Дж. Ст рук т ура Солид са. 2022, 238, 111395.

24. Хуанг, Л.; Тан, Дж.; Фу, Х.; Лю Дж.; Чен, Х.; Ля о, Х.; Ван, Х.; Ван, К. Неплоский механиз м иниц иирования и распрот ранения множест венные г ид рораз рывы в плот ных к олле к т орах с уч ет ом эффек т ов т ени напря жений. англ. Фрак т. Мех. 2023, 292, 109570.

25. Ву, М.; Чжан, DM; Ван, WS; Ли, MX; Лю С.М.; Лу, Дж.; Гао, Х. Численное мод елирование г ид рораз рыва пласт а на основе двумерная рек онст руц ия морфологи и поверхност ного разрушения и к омбини рованный мет од к онеч ных диск рет ных элемент ов. Дж. Нэт. Газовая наук а. англ. 2020, 82, 103479.

26. Ву, М.; Ван, В.; Чжан, Д.; Дэн, Б.; Лю С.; Лу, Дж.; Луо, Ю Чжао, В. Мет од пик сель ной рек онст руц ии т рещин: от разрушения из ображение для геологич еск ой мод ели т рещины для мод елирования развит ия т рещин. К онст р. Ст роит ь. Мат ер. 2020, 273, 121733.

27. Ву, М.; Ван, В.; Песня, З.; Лю Б.; Фэн, К. Исслед ование влия ния неоднородност и на г ид рораз рыв пласт а на основе к омбини рованный к онеч но-диск рет ный мет од. англ. Фрак т. Мех. 2021, 252, 107835.

28. Лю К.; Сан, Л.; Лю П.; Чен, Л. Мод елирование одновременного множест венного раз рыва пласт а с исполь зованием к омбини рованного к онеч но-диск рет ного элемент а Мет од. Геофлюид с 2018, 2018, 4252904.

29. Ружь е, Э.; Мунджива, А.; Лей, З.; Чау, ВТ; Найт, Э.Э.; Хант ер, А.; Сринивасан, Г. К омбини рованный пласт ич еск ий и диск рет ный перелом деформац ионный к аркас для FDEM. Межд. Дж. Нумер. Мет оды англ. 2019, 121, 1020-1035.

30. Ян, К.; Цз я о, Ю-Ю Чжэн, Х. Полност ью з анный т рехмерный г ид ромеханич еск ий под ход с исполь зованием к онеч ных диск рет ных элемент ов с реаль ными поровая филь т рац ия для мод елирования 3D ГРП. Вын ислит ь. Геот ех. 2018, 96, 73-89.

31. Ву, З.; Сан, Х.; Вонг, LNY. Численный мет од многообразия на основе к оге з ионных элемент ов для мод елирования г ид рораз рыва пласт а с Вороньм Зерном. Рок. Мех. Рок. англ. 2019, 52, 2335-2359.

32. Ву, М.; Гао, К.; Лю Дж.; Песня, З.; Хуанг, Х. Влия ние неоднородност и горных пород на г ид рораз рыв пласт а: парамет рич еск ое исслед ование с исполь зованием к омбини рованный мет од к онеч ных диск рет ных элемент ов. Межд. Дж. Ст рук т ура Солид са. 2022, 234-235, 111293.

33. Ву, З.; Сий, Х.; Лю К.; Ян, Ю Мет од чис ленного многообразия на основе к оге з ионных элемент ов нулевой т олщины для расч ета механич еск их свойств в горных пород. поведение с мик розернами Вороного. англ. Аналь ный. Границ а. Элем. 2018, 96, 94-108.

34. Шарафисафа, М.; Алиабд я н З.; Сат о, А.; Шен, Л. К омбини рованное к онеч но-диск рет но-элемент ное мод елирование г ид рораз рыва пласт а в резервуары с аполненными швами. Геоэнергет ич еск ие науки. англ. 2023, 228, 212025.

35. Ши, Ф.; Ван, Д.; Ли, Х. Подход на основе XFEM для т рехмерного мод елирования г ид рораз рыва с уч ет ом сегмент ац ии фронт а т рещины Дж. Пет. наук. англ. 2022, 214, 110518.

36. Крамер, Д.; Фрихауф, К.; Робертс, Г.; Уиттакер, Дж. Интеграция DAS, анализа давления, обработки и перфорации на основе видео-визуализации для оценки эффективности лечения с ограниченным доступом. В материалах SPE «Технология ГРП» Конференция и выставка, Вудлендс, Техас, США, 5–7 февраля 2019 г.; п. D031C007P001.

37. Чен, Х.; Мэн, Х.; Ню Ф.; Тан, Ю. Инь, К.; Ву, Ф. Микросейсмический мониторинг стимулирующего резервуара сланцевого газа на юго-западе Китая: 2. Пространственная кластеризация, контролируемая ранее существовавшими разломами и трещинами. Дж. Геофиз. Рез. Твердая Земля 2018, 123, 1659–1672.

38. Оу, К.; Лян, К.; Ли, З.; Луо, Л.; Ян, Х. 3D-визуализация трещин гидроразрыва с использованием микросейсмического мониторинга: методология и приложение. Нефть 2022, 8, 92–101.

39. Лу, З.; Цзя, Ю. Ченг, Л.; Пан, З.; Сюй, Л.; Он, П.; Го, Х.; Оуян, Л. Микросейсмический мониторинг распространения гидроразрыва и сейсмического риска в сланцевом коллекторе с крутым углом падения. Нат. Ресурс. Рез. 2022, 31, 2973–2993.

40. Шан, Х.; Лонг, С.; Дуан, Т. Система трещин в коллекторе сланцевого газа: перспективный прогноз характеристик и методов моделирования. Дж. Нат. Газовая геофизика. 2021, 6, 157–172.

41. Ли, Ю. Ченг, Швейцария; Токсоз, М.Н. Сейсмический мониторинг роста зон гидроразрыва в Фентон-Хилл, Нью-Мексико. Геофизика 1998, 63, 120–131.

42. Дахит-Алегани, А.; Гонсалес-Чавес, М.; ЮХ.; Асала, Х. Численное моделирование распространения трещин гидроразрыва в естественных условиях трещиноватых пластов с использованием модели зонирования. Дж. Пет. наук. англ. 2018, 165, 42–57.

43. Ван Х. Распространение гидравлических трещин в коллекторах естественной трещиноватости южные трещины или сетчатые трещины. Дж. Нат. Газ наук. англ. 2019, 68, 102911.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и учредителю(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) несут ответственность за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.