



# Моделирование эффектов гидроразрыва пласта на полномасштабных моделях при помощи метода создания дополнительных соединений

## SIMULATION OF THE EFFECTS OF HYDRAULIC FRACTURING ON FULL-SCALE MODELS USING THE METHOD OF CREATING ADDITIONAL CONNECTIONS

D. SHAKHOV, M. IARYSHEV, Schlumberger Information Solutions

This article is dedicated to the method of creating additional connections for full-field hydraulic fracturing effects modeling. The article describes the concept of the method, its comparison to other hydraulic fracturing effects modeling techniques and also presents an example of this method results validation in comparison to explicit hydraulic fractures modeling.

**Keywords:** Method of joints, simulation of the effects of hydraulic fracturing, hydraulic fracturing on full-scale models, EasyFrac, modeling of hydraulic fracturing in Petrel

**Г**идравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из самых распространенных методов интенсификации притока из нефтяных и газовых резервуаров. Среди российских нефтегазодобывающих компаний широко применяется практика массового использования ГРП в низкопроницаемых коллекторах как на добывающих, так и на нагнетательных скважинах, с целью увеличения коэффициента продуктивности скважин, области дренирования и достижения таким образом рентабельных уровней добычи на месторождении.

При массовом применении гидравлического разрыва пласта на месторождениях эффекты, связанные с трещинами, играют ключевую роль в определении фильтрационных потоков в пласте. Возможность учета этих эффектов на полномасштабных гидродинамических моделях является крайне важной, так как это напрямую влияет на качество их адаптации и возможность дальнейшего использования для планирования разработки.

Сегодня известны различные способы моделирования ГРП на гидродина-



**Д.С. ШАХОВ,**  
технический консультант  
Schlumberger Information  
Solutions  
DShakhov@slb.com



**М.Г. ЯРЫШЕВ,**  
инженер по реализации  
сервисных услуг  
Schlumberger Information  
Solutions

*Статья посвящена методу моделирования эффектов гидроразрыва пласта на полномасштабных гидродинамических моделях путем создания дополнительных соединений. Описывается сущность метода, его преимущества над другими методами моделирования эффектов гидроразрыва пласта, а также приведено обоснование достоверности получаемых результатов на примере сравнения с «эталонным» методом моделирования.*



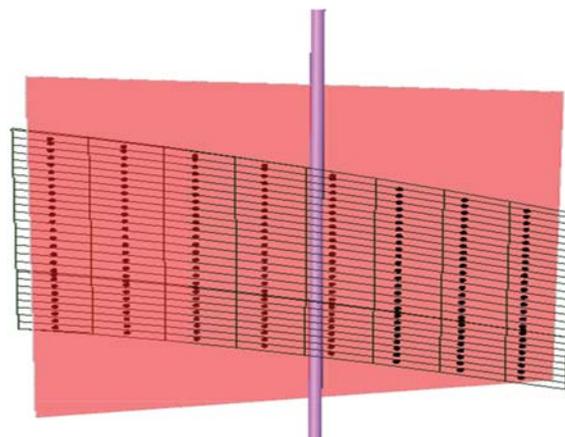


Рис. 1. Ячейки сетки, вскрытые трещиной (розовая плоскость), для которых создаются дополнительные соединения

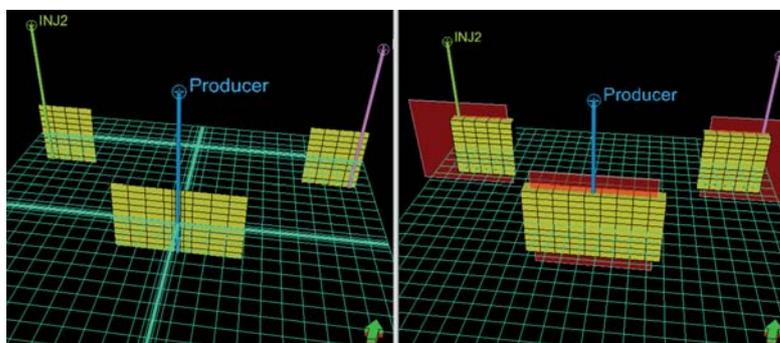


Рис.2. Модели трещины ГРП (слева – трещина в явном виде (тартан-сетка), справа – метод дополнительных соединений (EasyFrac)

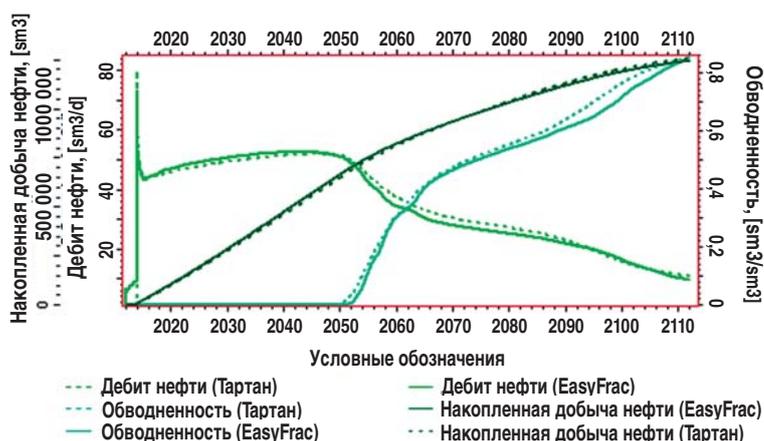


Рис. 3. Результаты моделирования трещины в явном виде и при помощи EasyFrac

мических моделях [1,2,3], применение которых зависит от решаемых задач, ключевых физических процессов фильтрации и степени изученности месторождения. Наибольшее распространение получили два подхода: моделирование трещины в явном виде при помощи измельчения сетки вблизи трещины, а также вычисление и использование модифицированных коэффициентов соединения «скважина-ячейка» или отрицательного скин-фактора.

Оба метода имеют свои преимущества и недостатки. Так, например, моделирование эффектов трещин при

помощи скин-фактора не позволяет учесть геометрические характеристики трещины, в то время как моделирование трещин в явном виде может значительно увеличивать время расчета, а также имеет ограничения, связанные с ориентацией ячеек гидродинамической сетки.

Метод моделирования эффектов ГРП при помощи создания дополнительных соединений позволяет преодолевать перечисленные недостатки и получать надежные результаты с минимальными затратами времени и вычислительных ресурсов. Данный метод лучше всего применим для моделирования большеобъемного ГРП (с размером полудлины трещины большим, чем геометрический размер ячейки) на полномасштабных моделях с большим количеством скважин. Так, при размере ячейки 100 на 100 м корректное моделирование результатов проведения ГРП с полудлиной трещины более 75 м потребует вскрытия соседних по латерали ячеек.

Такой метод реализован компанией Schlumberger в виде модуля EasyFrac на программной платформе для геологического и гидродинамического моделирования Petrel\*. Пользователь задает геометрию трещины, а именно такие параметры, как ее ориентация, полудлина, высота распространения и ширина. На основании этих данных находятся ячейки модели, вскрываемые плоскостью трещины, в которых и создаются дополнительные соединения (рис. 1).

Для моделирования притока флюидов из пласта, в каждой из вскрытых ячеек рассчитывается коэффициент соединения. Для определения его величины используется аналитико-эмпирический метод. Расчет осуществляется в два этапа. На первом определяется значение безразмерного коэффициента продуктивности для скважины с заданными параметрами трещины ГРП для пласта со средней толщиной и проницаемостью, определенной по ячейкам, вскрытым трещиной. Расчет основан на модификации формулы М. Экономидеса [4] и использует в качестве входных параметров кроме геометрических параметров трещины значения радиуса дренирования скважины, эффективной проницаемости проппанта.

На втором этапе выполняется переход от безразмерного коэффициента продуктивности для скважины с ГРП к коэффициентам соединения отдельных ячеек. Эмпирические зависимости учитывают изменение радиуса Писмана от размера ячейки, анизотропию про-



ницаемости и эффект «штуцирования» (ограничение пропускной способности «трещины в ячейке», когда приток флюидов с крыльев трещины оказывается больше потока вдоль трещины).

Использование такого подхода позволяет достаточно точно спрогнозировать значение коэффициента продуктивности в зависимости от параметров трещины и свойств пласта на установившемся режиме фильтрации.

### СРАВНЕНИЕ С МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В ЯВНОМ ВИДЕ

Описанная методика проверялась в сравнении с результатами моделирования трещины при помощи измельченных ячеек. Данный метод был принят за «эталонный», поскольку позволяет учесть геометрию и параметры трещины в явном виде.

Модель для сравнения представляет собой элемент пятиточечной системы разработки с добывающей скважиной в центре и четырьмя нагнетательными скважинами, расположенными по углам. Размер модели – 1000x1000x40 м. Средняя пористость в модели – 10%, средняя проницаемость – 1 мД.

Добыча и нагнетание ведутся на фиксированных забойных давлениях. Через два года после начала разработки на добывающей скважине и на двух нагнетательных производится ГРП со следующими свойствами образовавшихся трещин:

Табл. 1.

Параметр трещины	Величина
Номинальная проницаемость проппанта	700 000 мД
Эффективная проницаемость проппанта в пласте	500 000 мД
Полудлина	160 м
Ширина	0,005 м
Мощность вскрытия	Весь пласт

На рис. 2 показаны модели трещин, заданных в явном виде, а также при помощи дополнительных соединений. Для моделирования трещины в явном виде используется сетка, в которой размер ячеек уменьшается по логарифмическому закону при приближении к забоям скважин с проведенным ГРП (тартан-сетка или «шотландка»). Размер наименьших ячеек, представляющих трещины, равен 0,5 м; соответственно, проницаемость этих ячеек рассчитывается из условия сохранения проводимости трещины (произведение проницаемости и ширины):

$$K_{\text{трещ}} = 500\,000 \cdot 0,005 / 0,5 = 5000 \text{ мД.}$$

При моделировании трещин методом дополнительных соединений (EasyFrac) использовалась простая регулярная сетка с постоянным размером ячеек (40x40 м).

По результатам расчетов сравнивались дебит и накопленная добыча нефти, обводненность, а также кубы давлений на окончание расчета.

Как видно по результатам (рис. 3, 4), наблюдается очень хорошее соответствие между расчетами. При этом время расчета варианта с использованием EasyFrac оказалось более чем в 10 раз меньшим (рис. 5).

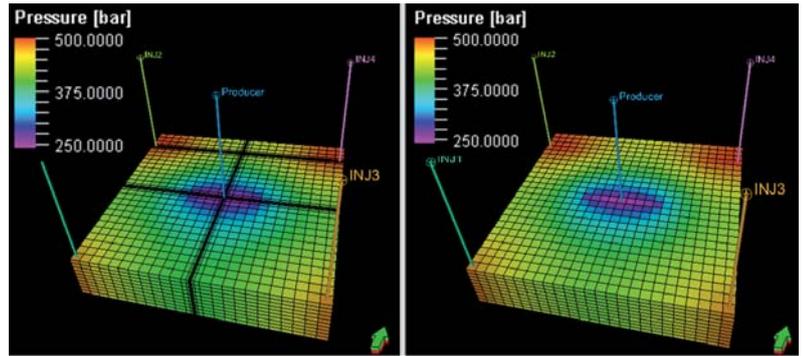


Рис. 4. Сравнение воронок депрессии (слева – тартан-сетка, справа – EasyFrac)

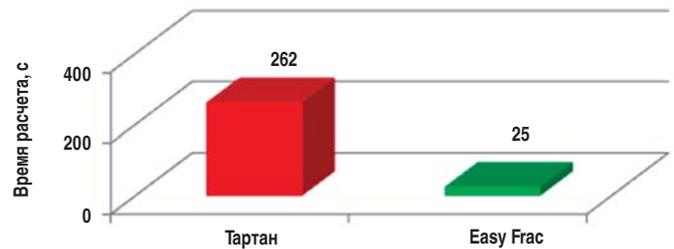


Рис. 5. Сравнение времени расчета

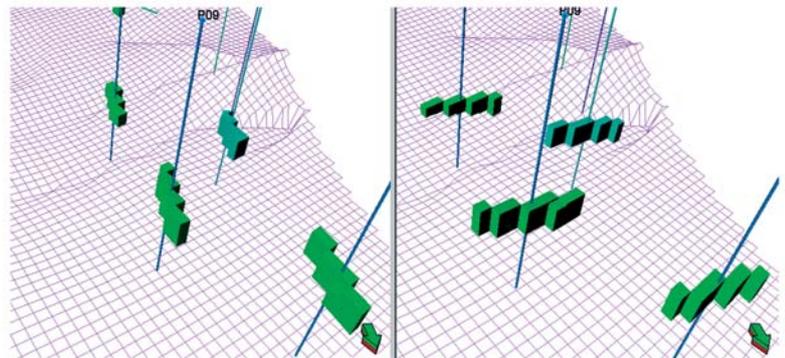


Рис. 6. Модели трещин с различной ориентацией (слева – 0°; справа – 90°)

### НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН

Одним из ключевых преимуществ метода дополнительных соединений является возможность изменения параметров трещин без необходимости модификации геометрии сетки, что делает его очень удобным в применении на полномасштабных моделях для изучения влияния параметров трещин на показатели разработки месторождений с массовым ГРП, в частности, при проведении адаптации модели на историю.

Далее рассмотрен пример использования данного подхода для проведения анализа чувствительности на тестовой модели с 15-ю скважинами, на которых был смоделирован ГРП. В качестве неопределенных параметров были приняты полудлина, ориентация и ширина трещин, диапазоны значений которых изменялись согласно табл. 2.

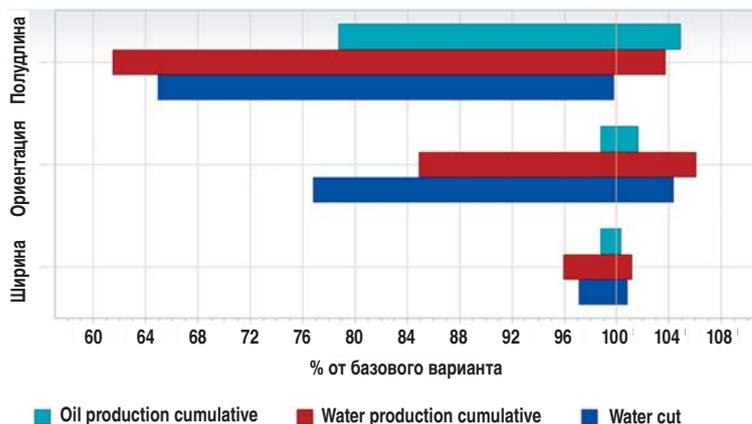


Рис. 7. Результаты анализа чувствительности

Табл. 2.

Параметр трещины	Диапазон изменения
Полудлина	100 – 200 м
Ориентация	0 – 90 о
Ширина	0,001 – 0,005 м

В ходе анализа были автоматически сгенерированы и рассчитаны несколько вариантов с изменяющимися геометрическими характеристиками трещин. На рис. 6 показаны модели с различным значением ориентации для двух вариантов.

Расчет каждого из таких вариантов занимает время, приблизительно равное времени расчета базового варианта с отсутствием моделей трещин, что позволяет производить высокоточную и оперативную оценку влияния параметров трещин. На рис. 7 показано влияние геометрических характеристик трещины на накопленные добычи нефти и воды, а также на обводненность, полученное по результатам анализа чувствительности.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ EASYFRAC

Модуль EasyFrac, реализованный на платформе Petrel, позволяет моделировать различные эффекты ГРП на существующих гидродинамических моделях путем использования функционала симулятора ECLIPSE\*. Помимо моделирования притока флюидов из пласта за счет создания дополнительных соединений в ячейках, вскрытых трещиной, модуль предоставляет следующие возможности:

- моделирование уменьшения эффекта ГРП со временем;
- учет распространения трещины в неколлекторах (за пределы продуктивного пласта и в неактивных ячейках);
- моделирование эффекта опережающего прорыва воды по трещине на скважинах с ГРП;
- возрастание приемистости нагнетательных скважин при превышении заданного значения давления гидроразрыва пласта (авто-ГРП) и обратный эффект.

Благодаря реализации на многофункциональной программной платформе модуль EasyFrac имеет ряд дополнительных удобств. Помимо возможности гибкого варьирования параметров трещин и проведения анализа чувствительности модуль также обеспечивает удобство при работе с большим количеством скважин, позволяет обмениваться данными между проектами путем поддержки экспорта и импорта в табличном формате.



Кроме этого в рамках комплексного подхода к моделированию ГРП модуль EasyFrac может применяться совместно с другими наукоемкими технологиями и инструментами, доступными на платформе Petrel.

### Выводы

– Моделирование ГРП при помощи создания дополнительных соединений позволяет производить оценку эффектов ГРП на полномасштабных и секторных моделях с большим количеством скважин, с высокой степенью достоверности, при относительно небольших затратах времени и вычислительных ресурсов.

– Модуль EasyFrac располагает широким набором инструментов по моделированию различных эффектов ГРП на существующих гидродинамических моделях путем использования функциональных возможностей симулятора ECLIPSE.

– Реализация данного модуля на многофункциональной программной платформе Petrel открывает доступ к дополнительным возможностям по углубленному и комплексному моделированию ГРП.

### Литература

1. ECLIPSE Technical Description, Well Inflow Performance, Fractured completions, 2013.1. 1297 p.
2. Каневская Р.Д. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: Недра, 1997. 211 с.
3. Майер В.П., Батулин Ю.Е. Программный комплекс «Техсхема» // Нефтяное хозяйство, 2004. № 2. С. 52 – 53.
4. Unified Fracture Design. Economides M.J., Oligney R.E., Valko P.P. 2002)

### Представительство компании

#### Schlumberger в г. Москве

Москва, Ленинградское шоссе, 16А, стр.3

Телефон: +7 (495) 935-82-00

Факс: +7 (495) 935-87-80

E-mail: sis-qa-ru@slb.com, www.sis.slb.ru

**Ключевые слова:** метод дополнительных соединений, моделирование эффектов гидроразрыва пласта, ГРП на полномасштабных моделях, EasyFrac, моделирование ГРП в Petrel