

Distinguished Lecturer Program

**Программа Выдающиеся лекторы в основном финансируется
Фондом SPE за счет добровольных взносов членов общества и средств,
выделяемых организационным комитетом выставок-конференций
Offshore Europe**

Общество инженеров-нефтяников выражает благодарность тем
компаниям, которые разрешают своим специалистам выступать с
лекциями в рамках этой программы

Дополнительное содействие оказывает АИМЕ
(Американский институт горного дела)



Общество инженеров-нефтяников
Программа выдающихся лекторов
www.spe.org/dl

Геомеханические проблемы естественно трещиноватых пластов: внушающие уверенность, сбивающие с толку, пугающие

Гэри Д. Каплз

Профессор Университета им. Хериота и Ватта ,
Эдинбург, Шотландия

HERIOT WATT INSTITUTE OF



PETROLEUM ENGINEERING

Общество инженеров-нефтяников
Программа выдающихся лекторов
www.spe.org/dl

Выражаем благодарность: Хелен Льюис (разработка Hydro-DDA, геомеханическое моделирование), Цзин-Шен Ма (апскелинг моделей), Жан-Мари Кестьё (гидродинамическое моделирование), Марк Рейнольдс (модели H-DDA), Дэйв Стернз (потоки флюидов в пласте и в стволе скважин)

Гэри Каплз

- Геологическое образование (механика горных пород)
- Работа в нефтяных компаниях (Амоко и др.)
- Преподавание гидрогеологии в Университете Глазго
- В 1998 году перешел в Университет Хериот-Ватта
- В настоящее время отчасти инженер, отчасти геолог

Цель настоящего выступления

- Опровергнуть некоторые ложные мифы о трещиноватых пластах
- Внести немного ясности в процесс геомеханического взаимодействия
- Обрисовать методы следующего поколения по прогнозированию показателей эффективности разработки пластов
- И поговорить о том, что мы можем сделать уже сейчас ...

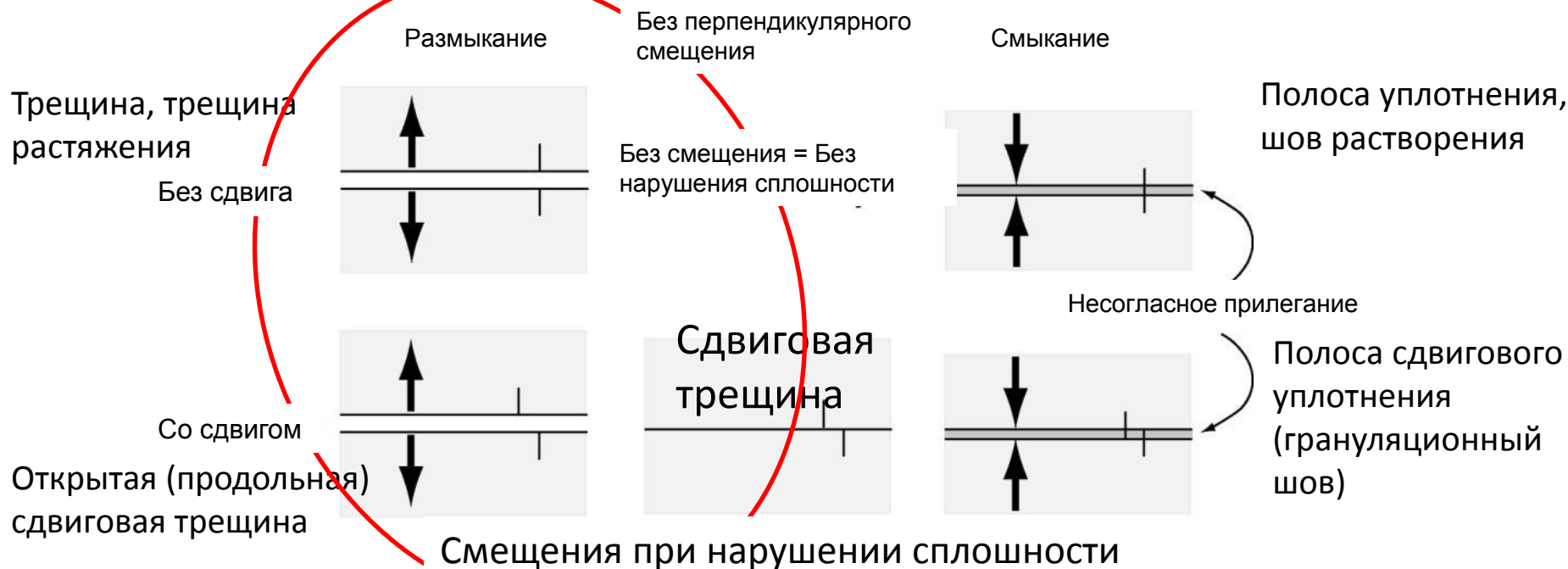
Последовательность выступления

- Краткий обзор по трещиноватым пластам
- Простые (но неверные) представления о трещиноватости
- Геомеханика блоковых структур и способы регулирования эффективных фильтрационных свойств
- Попытки составления алгоритма...

Все это относится к трещиноватым пластам, а также к нетрадиционным комплексам, в которых естественная трещиноватость является основной проблемой

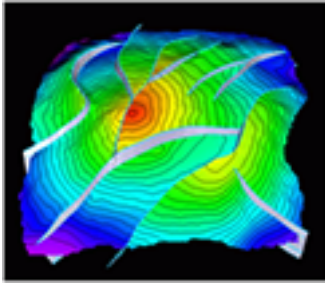
Значение понятия "трещина"

- Плоская область (возникшая в результате деформации), которая нарушает сплошность горной породы
- В данном случае нас интересуют "открытые" трещины, которые локально создают новое пористое пространство (повышают пористость и проницаемость)



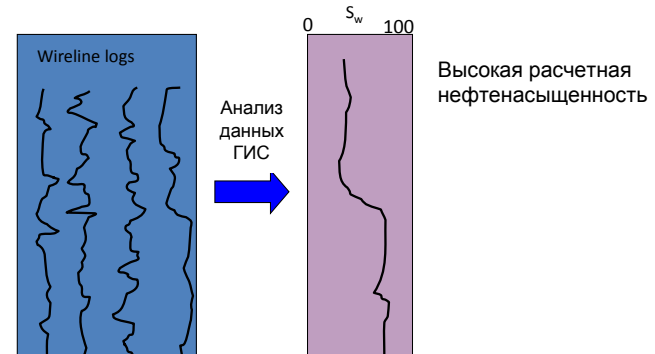
Ага! Наш пласт трещиноватый

Строим карту ловушки



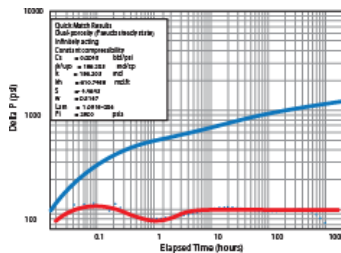
Бурим скважину-открывательницу; в продуктивном интервале получаем проявления

Данные ГИС внушают оптимизм

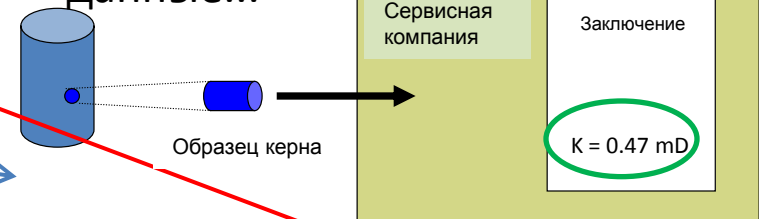


Проводим испытания скважин :

5000 барр/сут



Затем поступают керновые данные...



Расчет дебита

$PI = \text{very small } (1.2 \times 10^{-4} \text{ bbls psi}^{-1} \text{ day}^{-1})$

$P_{res} = 5 \times 10^3 \text{ psi}$

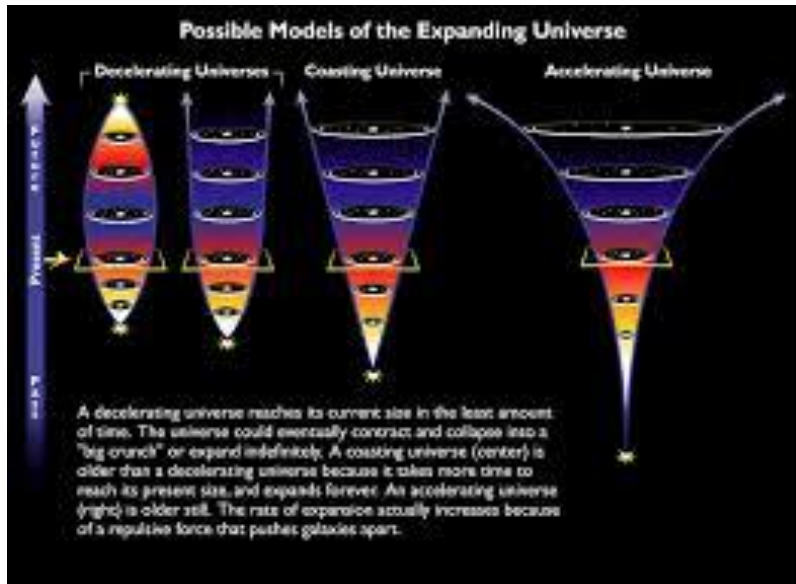
< 6 bpd !

Замечательно! Мы богаты!

$$STOIIP = GRV \times S_o \times \phi \times NTG \times B_o$$

Если ловушка большая ... может, несколько миллиардов баррелей...

О, нет! Коллектор-то трещиноватый



“Темная энергия” и “Темная материя”

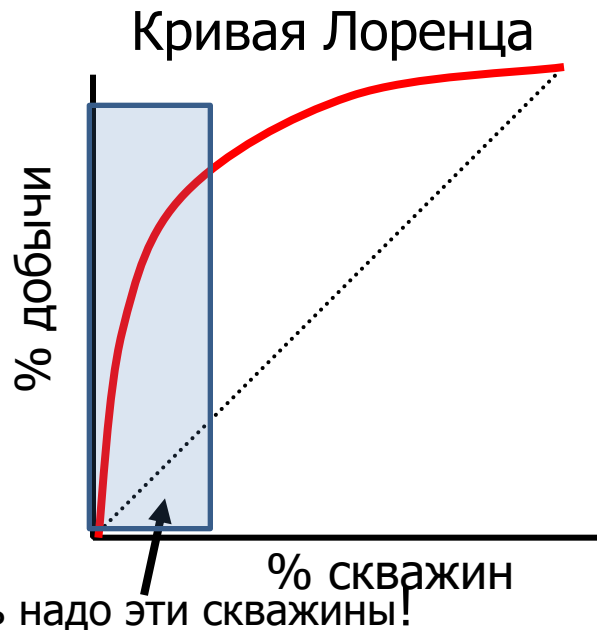
“Темная проницаемость”

“Одна из самых важных нерешенных проблем состоит в том, чтобы выявить источник **темной проницаемости**, предположение о существовании которой основано на том, что фактические дебиты выше, чем можно объяснить любым сочетанием известных элементов проницаемости” (Ричард Стил, Richard Steele, BG Group, семинар EAGE (Европейская ассоциация инженеров, геологов и геофизиков, Лондон, июнь 2013 г.)

Искажение объемов добычи

Допустим трещиноватый пласт со следующими характеристиками:

Супер-гигант со сроком эксплуатации ~ 40 лет, фонд скважин ~130:
12% накопленной добычи обеспечивает всего одна скважина ←
50% накопленной добычи обеспечивают всего 8 скважин
67% накопленной добычи обеспечивают всего 13 скважин



Если бы могли снизить расходы на разработку и пробурить только 20% фонда скважин, мы получили бы значительный экономический эффект ...

Есть сильное искушение подобрать более эффективные стратегии разработки и управления (почему скважины "работают"?)

Трещиноватые пласты неоднородны!

Взаимное влияние давления и проницаемости

Это главный вопрос!

- На показатели многих низкопроницаемых пластов влияет трещиноватость
- Динамика фильтрационных свойств позволяет предположить, что эффективная проницаемость пласта часто изменяется в процессе его эксплуатации
- Необходимо найти объяснение этой зависимости $[k_{\text{frax}}^{\text{eff}} = f(P, \sigma)]$ между давлением и проницаемостью:
 - Изменение сообщаемости с трещинами?
 - Изменение апертуры трещин?
- Эти модели простой причинно-следственной связи, которые обычно принимаются, настраиваются на историю добычи, с помощью которых прогнозируются показатели разработки и которые используются как эмпирические правила – **эти модели неверны**

Геомеханика

Основополагающее упущение

- Принятые упрощенные правила основаны на механических представлениях, условия которых неприменимы к реальным системам
- Упрощенные механические модели, на основании которых выведены эти правила, предполагают, что напряженное состояние при смещении стенок трещин остается постоянным
- В природе такое просто невозможно

Краткая справка

- Относительная деформация – показатель градиентов деформации сдвига, следовательно, изменяется по форме (греческая ε)
- Напряжение можно трактовать как интенсивность и направление приложения внутренних сил (с нормированием по площади), следовательно, реакция на нагрузки (греческая σ)
- Напряжение можно также трактовать как локальный показатель упругой (обратимой) энергии
- Зависимость между напряжением и деформацией определяет величину откликов

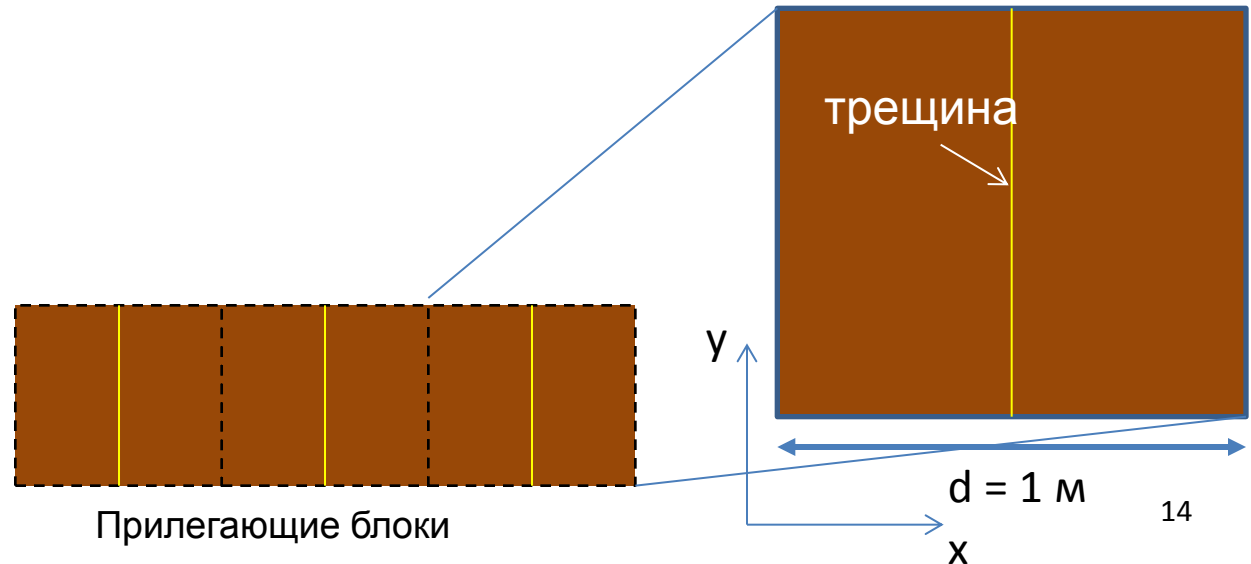
Представления, которые мы здесь анализируем

- Раскрытие и смыкание трещин → изменение напряжения
 - Следовательно, традиционные утверждения о том, что апертура трещин определяется эффективным напряжением, неверны
- Напряжение, параллельное трещинам, и раскрытие трещин
- Эффективное напряжение и пороупругость
- Неоднородность напряжений в блоковых структурах

Истинная правда

- Изменение апертуры трещин = смещение пород
- Вмещающих пород, поэтому апертура может увеличиваться только за счет сокращения матрицы прилегающей породы (в результате чего в ней повышается напряжение) или же за счет увеличения размеров всей массы, причем обратное также справедливо для смыкания трещин

При этом горная порода рассматривается как упругий материал



Аналогия

Простой мысленный эксперимент

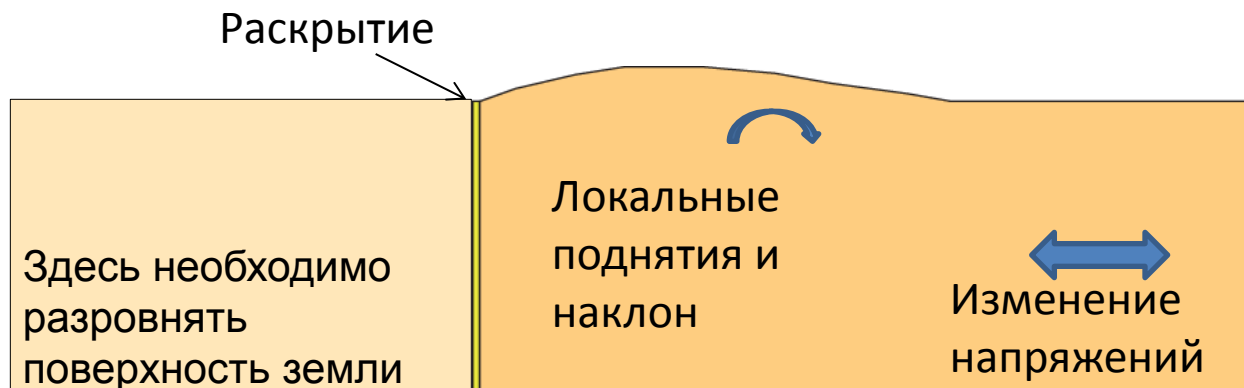


Домкрат выполняет роль
порового давления, которое
открывает трещины

- В аудитории стулья стоят вплотную один к другому
- Теперь предположим, что расстояние между ними увеличивается, НО длина ряда при этом остается неизменной ...
- Это возможно только в том случае, если каждый стул уменьшится в размере

Эта "задача" давно известна

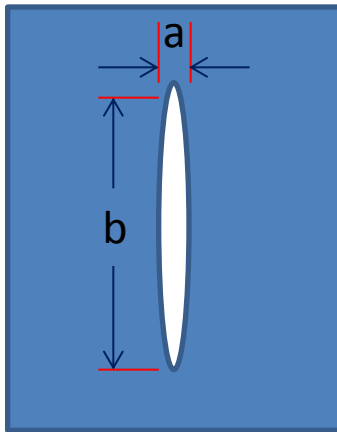
- При гидроразрыве пластов мы наблюдаем ту же динамику, когда трещины открываются и, следовательно, создают нагрузку на окружающие породы. Изменения напряжений, обусловленные одной стадией гидроразрыва, накладываются на изменения, происходящие на следующих стадиях, и происходит локальное поднятие и наклон грунта (для мониторинга применяются инклинометры).
- То же явление отмечается при строительстве геотехнических сооружений, например, железобетонных плотин



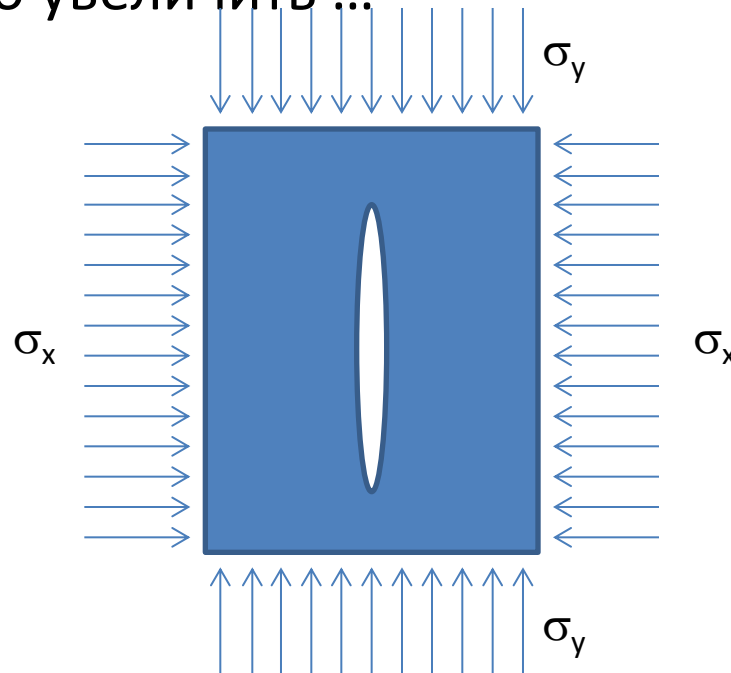
Напряжение
не остается
неизменным...

Трещины, параллельные направлению нагрузки

- Простая модель упругого твердого тела с отверстием эллиптической формы
- Затем на границах к модели прилагаются нагрузки, и отверстие меняется
- Если $\sigma_y > \sigma_x$, то сама модель становится шире! **Хоп...** та же проблема а σ_x нужно увеличить ...



Примечание: на такой модели рассчитывается устойчивость стенок скважины, но она неверна

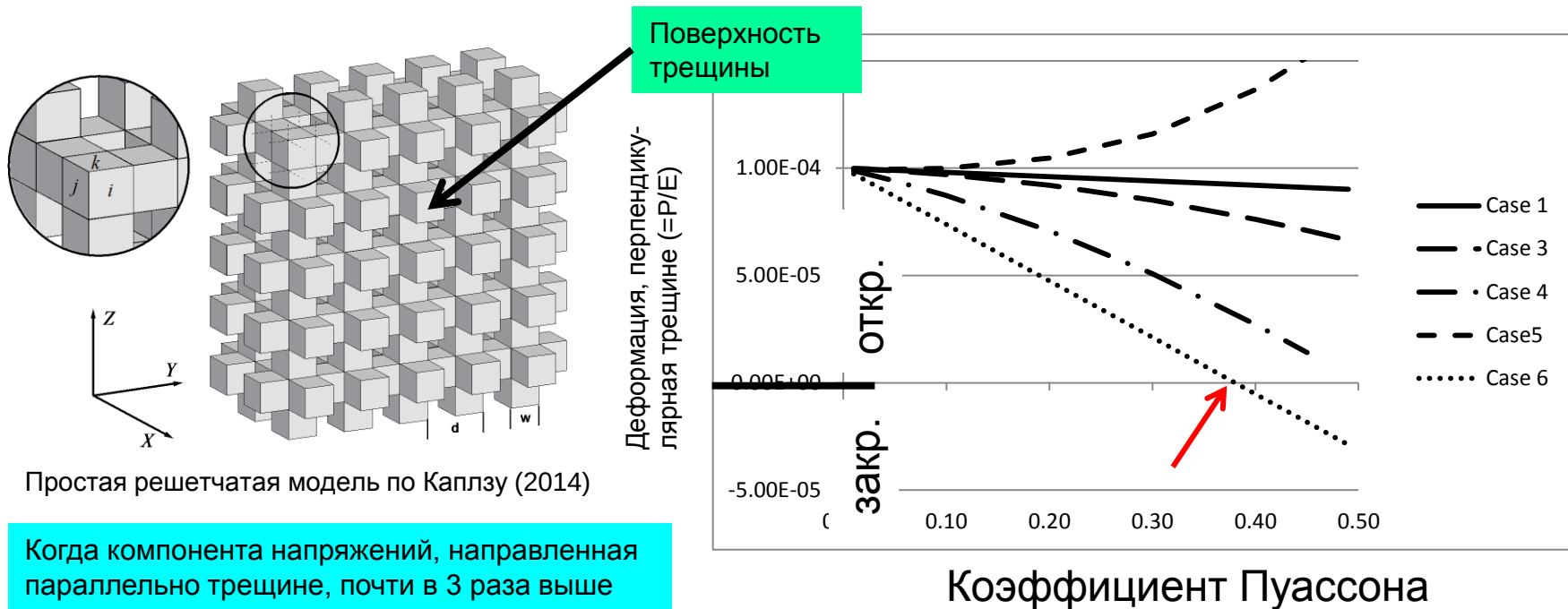


Пороупругость



Под действием повышенного давления флюидов элементы каркаса породы сжимаются, в результате трещины обычно раскрываются

- В пороупругих системах под действием повышенного напряжения, ориентированного параллельно направлению трещин, трещины смыкаются. ...Упс



Простой упругости недостаточно

Почему?

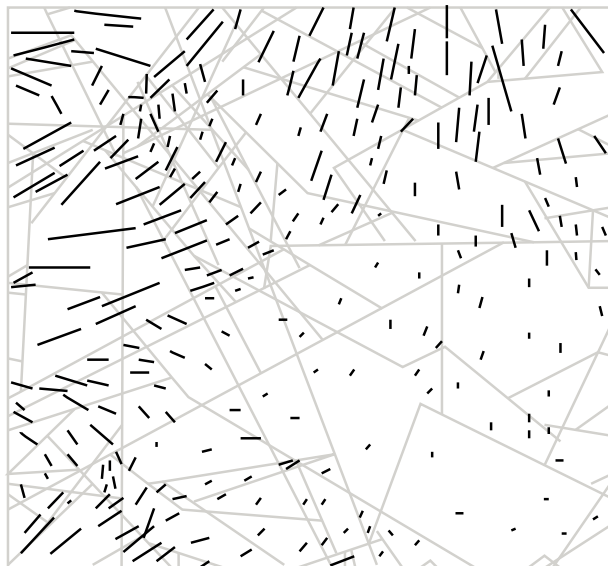
- Такие "трудности" при моделировании возникают потому, что геологи и другие специалисты приучены считать, что напряжение в пласта имеет постоянное значение или хотя бы произвольное, поэтому мы поддаемся соблазну и используем упругость, в связи с простотой ее применения.
- Системный подход к геоматериалам выявляет ошибочность этой точки зрения
- В действительности, напряжение - это зависимый параметр, который характеризует механическое состояние

Напряжение – это индикатор состояния и интенсивности энергии деформации.

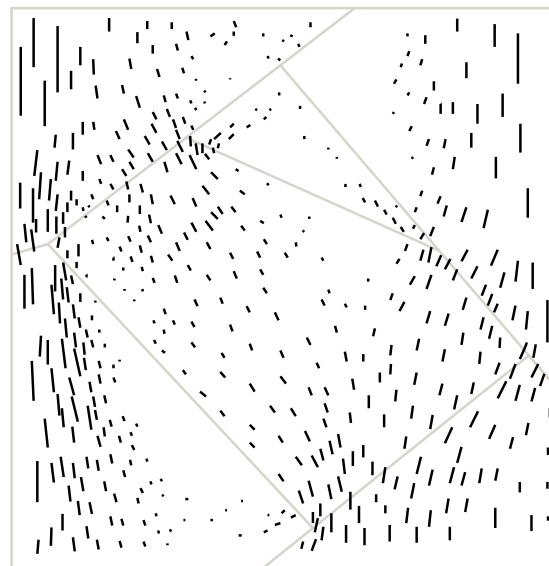
Неоднородность напряжений

“Ни одна трещина представления не имеет о напряжении в удаленной части месторождения”
цитата, приписываемая (в журнале First Break) Гари Каплзу при его выступлении на семинаре EAGE в Лондоне в июне 2013 г.

- Два примера напряженных состояний в пласте, осложненном нарушениями сплошности
- В удаленной части пласта нагрузки распределены просто и однородно, а возникшее внутреннее состояние уже неоднородно



Baghbanan и Jing (2008)



Hall и др.. (2007)

Черными линиями обозначено направление и величина σ_1
Серыми линиями обозначены границы блоков

Если новые созданные трещины ориентированы вдоль текущего σ_1 , то они будут параллельны существующим трещинам или направлению нагрузки в удаленной части месторождения, поэтому не стоит рассчитывать, что трещины будут ориентированы в нужном нам направлении.

Что происходит?

- Блоковая геомеханика свидетельствует о нелинейных взаимодействиях (к тому же НЕ упругих).
- Напряженное состояние неоднородное.
- Поровые флюиды (в особенности в динамических условиях) обеспечивают еще одно двунаправленное взаимодействие
- Третью ось взаимодействия обеспечивают тепловые эффекты
- Отклик системы недетерминистический, но характеризуется непредсказуемой динамикой
- Чтобы разобраться в поведении пласта, необходимо прибегать к численному гидродинамическому моделированию

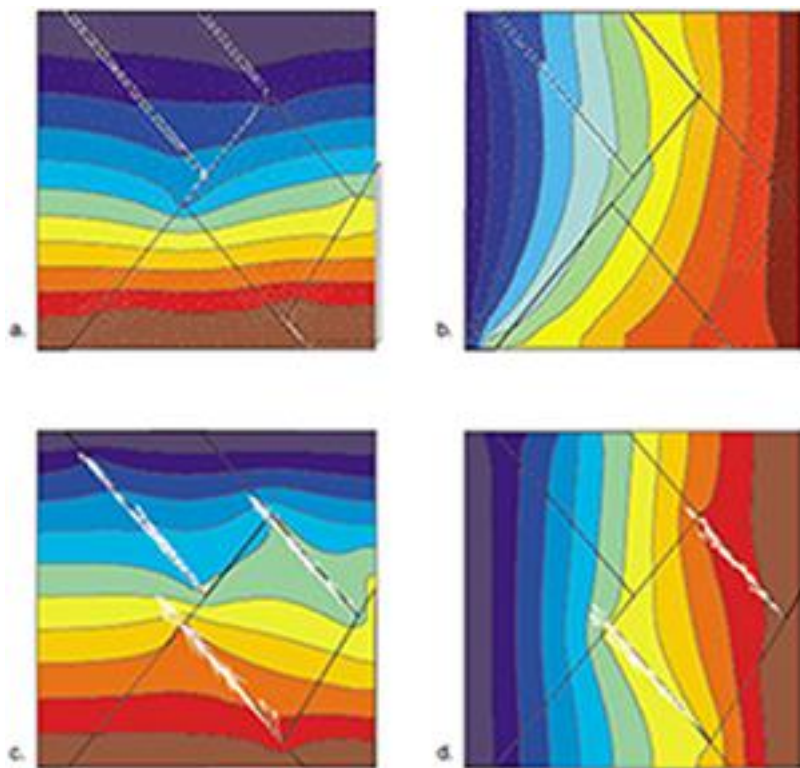
Hydro-DDA

- В приведенных ниже примерах использованы результаты гидродинамического моделирования *2D Hydro-DDA*
- В котором сочетается поток однофазного флюида и симулятор дисконтинуума (разрывной среды) и отображается геомеханика трещиноватых блоковых структур
- DDA обозначает анализ разрывных деформаций (Discontinuous Deformation Analyses) (Lin, 1995; Shi и Goodman, 1998)

Hydro-DDA была создана Хелен Льюис и Мо Руайниа (Rouainia и др. 2006)

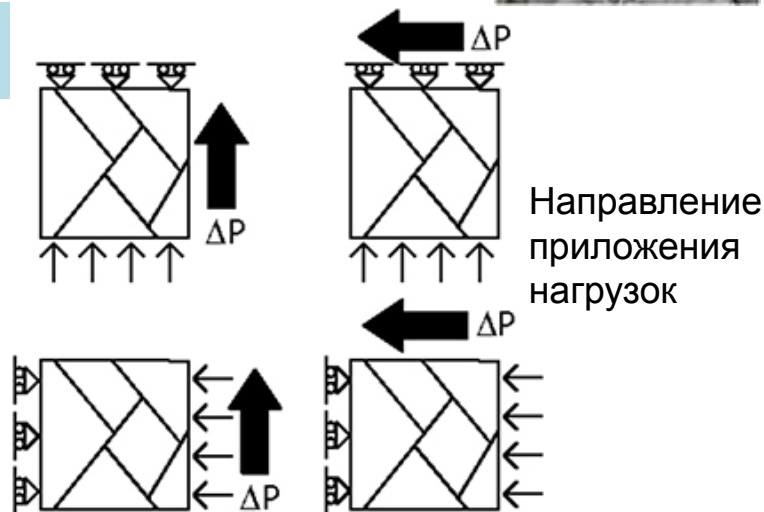
Результаты гидродинамического моделирования

Следует отметить, что трещины с наибольшим расходом с трудом поддаются прогнозированию, если известно направление сжатия.



Цвета: изобары

Белые стрелки: скорость Дарси (фильтрации)



Эти результаты НЕ СОГЛАСУЮТСЯ с теорией, что апертура и проводимость трещины определяются эффективным напряжением.

Нецелесообразно прогнозировать апертуру (а следовательно, и расход) только по давлению жидкости или по нагрузке.

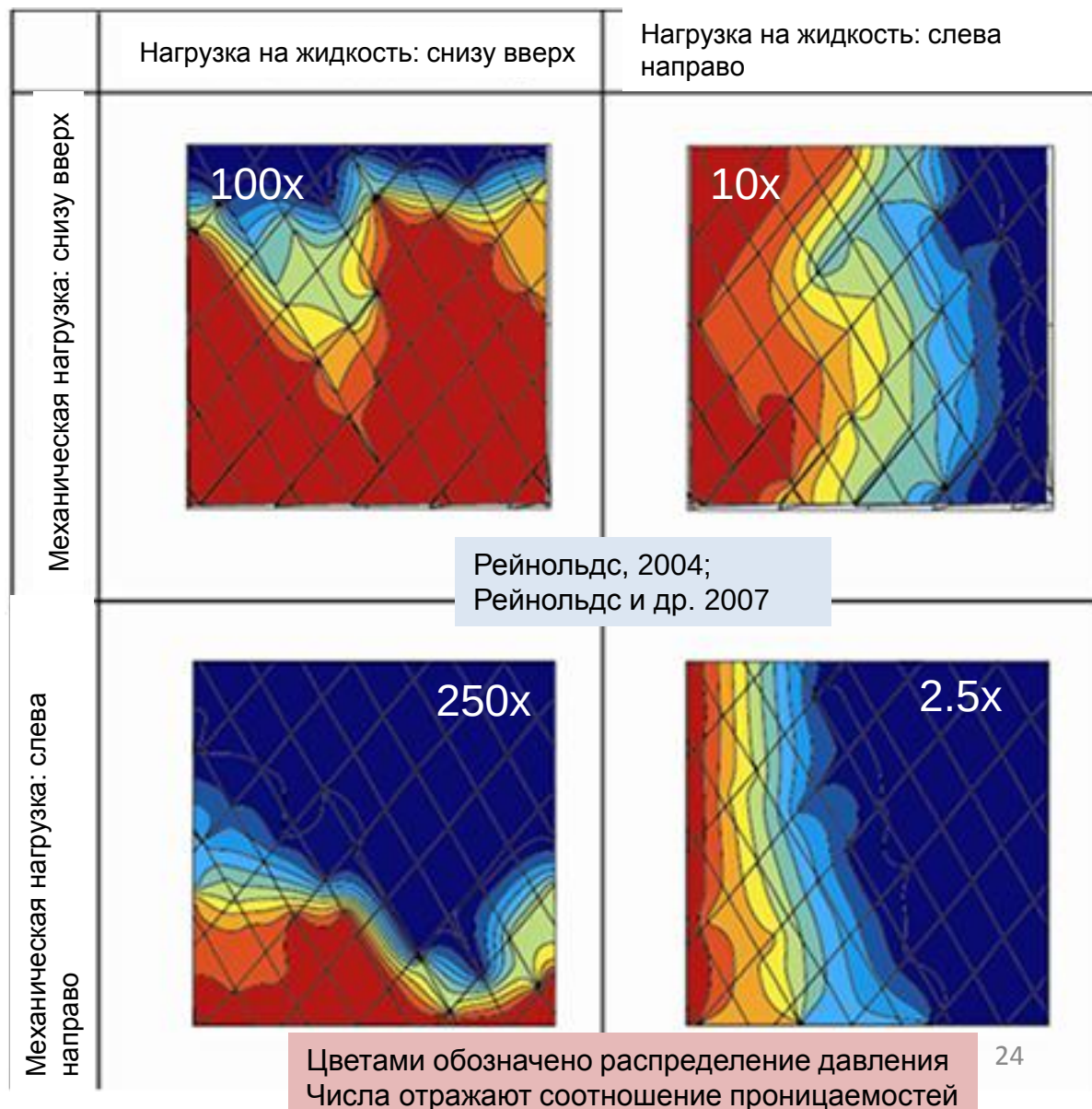
Регулярная сетка трещин

На каждой вставке одна и та же модель (симметричное расположение трещин равноудаленные одна от другой), разная только нагрузка (как на предыдущем слайде)

Обратите внимание, как меняется характер фильтрации, что отражает разную эффективную проницаемость в каждом отдельном случае.

Самые высокие значения эффективной проницаемости наблюдаются НЕ в тех случаях, когда текущая нагрузка равна возмущающей нагрузке!

В пласте с неравномерно распределенным напряжением (норма) при таком же рисунке распространения трещин их эффективные свойства будут другими в зависимости от локальных условий.

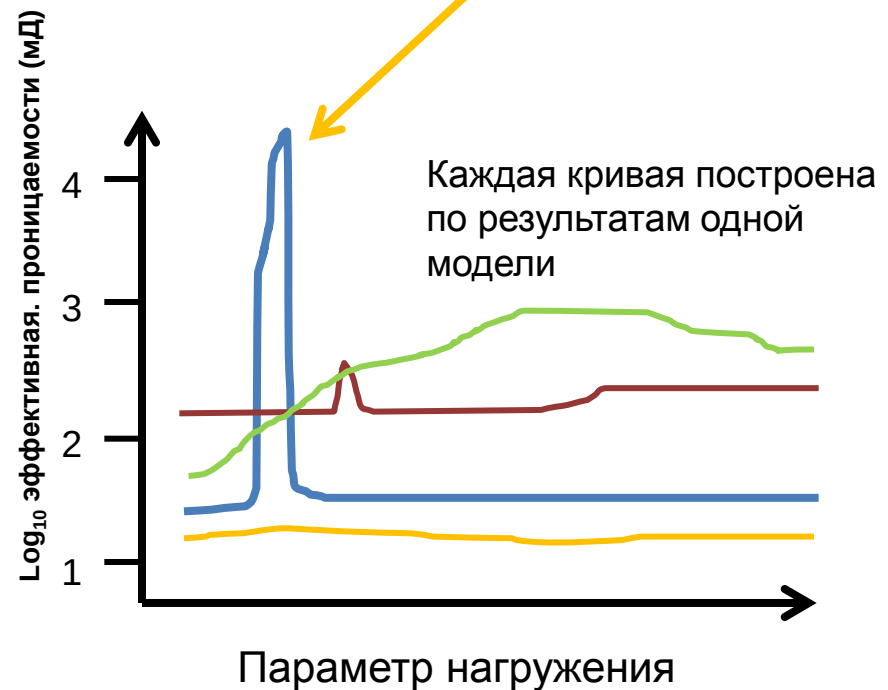


Сочетания параметров

- На моделях лишь нескольких конфигураций мы наблюдаем значительное повышение эффективной проницаемости в результате небольшого изменения параметров модели – зачастую в ограниченном диапазоне
- В нелинейном масштабе на диаграмме наблюдается ветвление.

Примечательно, что странные результаты в основном получены при наличии сильного энергетического градиента жидкости.

Значение изменилось на 3 порядка!

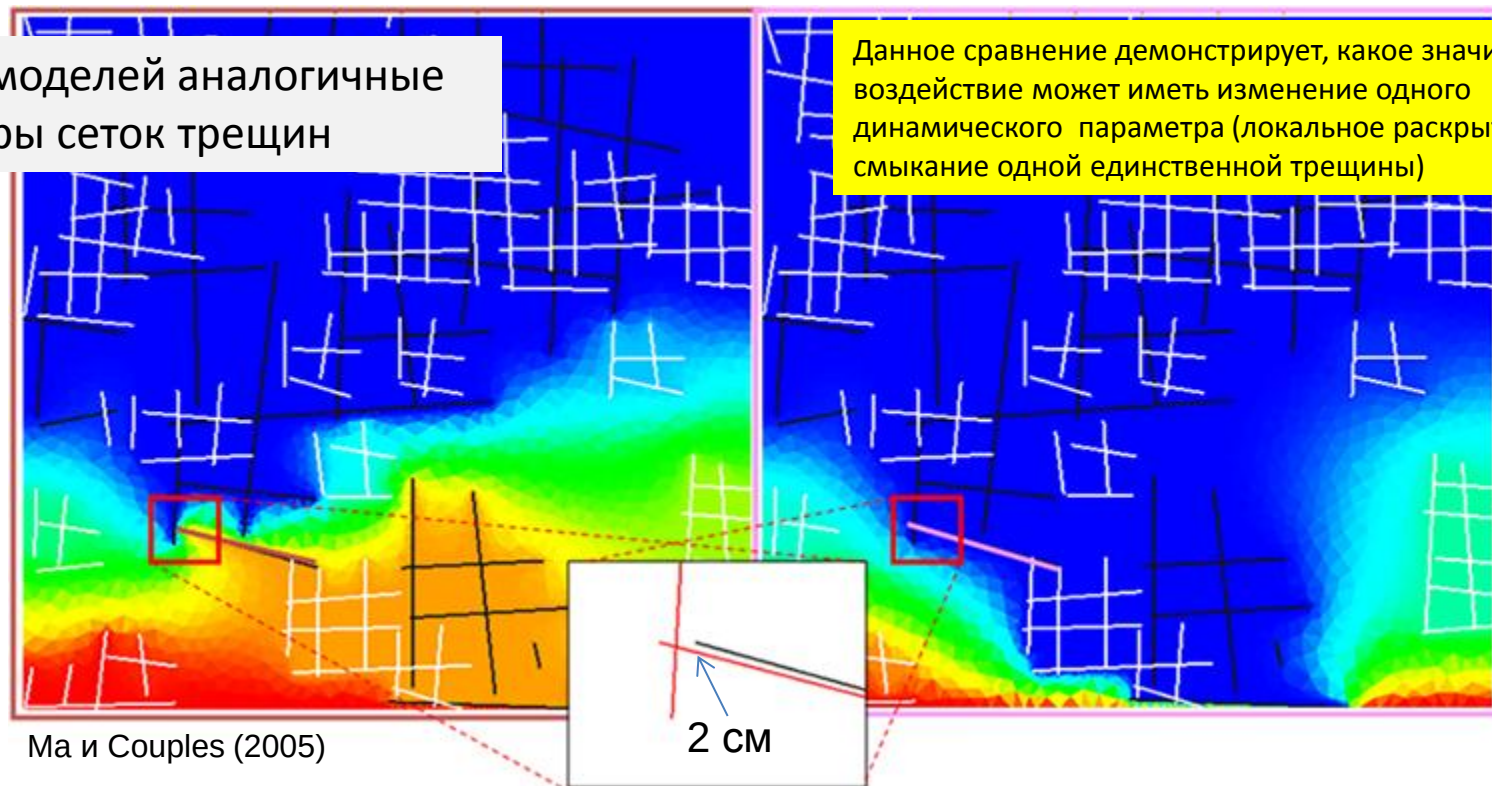


Можете себе представить, как сложно найти значения всех этих параметров в многомерных пространствах...

Мельчайшие изменения сообщаемости

У обеих моделей аналогичные параметры сеток трещин

Данное сравнение демонстрирует, какое значительное воздействие может иметь изменение одного динамического параметра (локальное раскрытие или смыкание одной единственной трещины)



•Цветом обозначено давление. Черными и белыми линиями нанесено расположение трещин. Модели различаются весьма незначительно – лишь мельчайшее изменение в сообщаемости сети трещин (см. вставку). Эффективная проницаемость в правой модели в **6 раз выше** проницаемости в левой модели. Такое изменение невозможно спрогнозировать по данным о распределении трещин.

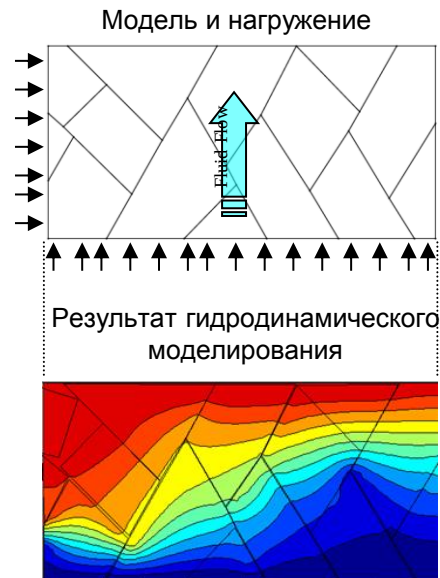
В данном случае все дело в **СООБЩАЕМОСТИ** в системе трещин

Геомеханика+Жидкости+Тепловые МУН

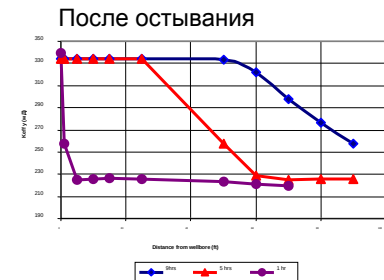
- Добавляем еще одну возможность взаимодействия ...
- Характерную в особенности для нагнетательных скважин
- Но также применимую в большинстве МУН (тепловые методы)

• На модели справа приведен расчет на гидродинамической модели значений эффективной проницаемости массива трещиноватой геотермальной горной породы в нагруженном состоянии, в который для интенсификации притока была закачана холодная вода, после чего породе дали время на восстановление равновесного состояния. В зависимости от удаленности от нагнетательной скважины постоянное повышение проницаемости составило от 10 до 50 раз.

При применении данной технологии происходит смещение блоков, которое приводит к расклиниванию раскрытых трещин.



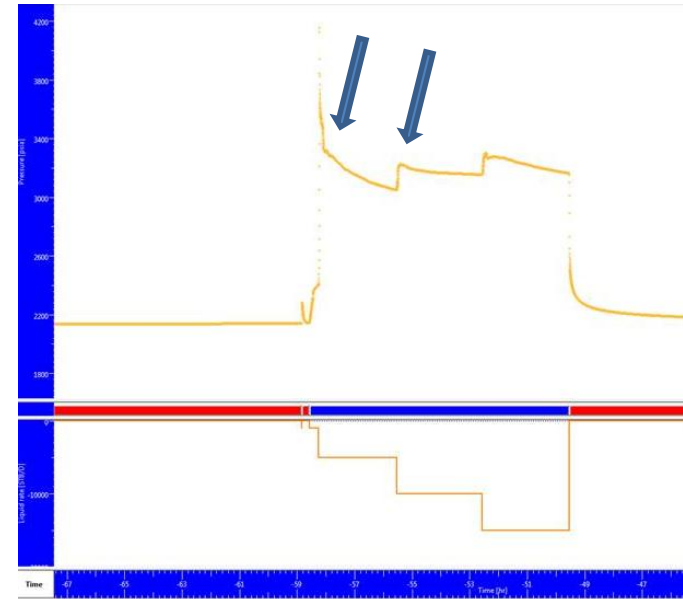
Зависимость K_{eff} от положения



Реальный пример ...

Если у вас есть свои реальные примеры, расскажите нам о них.

- Испытание на приемистость, на трех расходах (5000, 10000, 15000 барр воды/сут.)
- Эффективная проницаемость намного повысилась после первой ступени
- Оператор утверждает, что это НЕ связано с созданием техногенных трещин (давление в нагнетательной скважине намного ниже σ_{frac})



Спасибо Питеру Робертсу

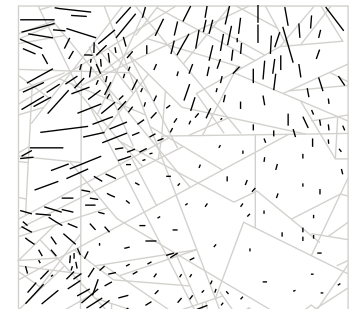
Возможно, это пример выше описанного влияния

Эффективные фильтрационные свойства

- Очень неравномерное распределение трещин по апертуре и изменчивость характеристик сети трещин
- Влияние фильтрации зависит от геометрической конфигурации структуры, которая не остается постоянной, и изменяется в зависимости от общих и локальных условий
- Изменения зачастую происходят не самым простым образом, поэтому упрощенные правила здесь не подойдут. Вероятно, можно вывести те или иные функциональные зависимости.
- Анализ в статических условиях не позволяет отобразить это влияние

Некоторые области применения

- “Традиционные” трещиноватые пласты
- Нетрадиционные – при воздействии на пласт закачиваемые жидкости поступают в систему естественной трещиноватости
- Применение тепловых методов повышения нефтеотдачи
 - Сочетание тепловой и гидравлической нагрузок
 - Можем ли мы создать новые каналы фильтрации?
- “Традиционные” пласты – проблемы с закачкой
- Вскрытие трещиноватых пластов ...



Применение в реальных условиях

- Значительные нелинейности, а следовательно, и неожиданные скачкообразные изменения эффективных свойств зачастую связаны с повышенными градиентами.
- Посмотрите, где, когда и почему такие градиенты могут встречаться в вашем пласте.

Градиенты, обусловленные :

Трещиноватыми коридорами

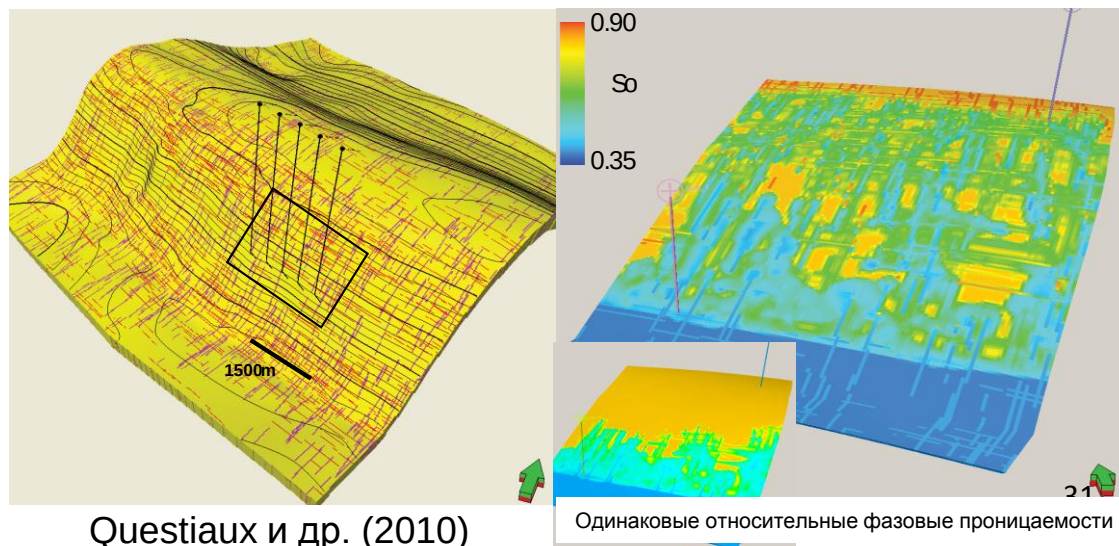
Близостью к скважинам

Границами флюидонасыщенных зон

Изменением температурных условий

Восстановлением активности структур

Такие изменения будут сильно влиять на апскелинг относительной фазовой проницаемости в трещиноватых коридорах



Итак, мы составляем наш алгоритм ...

- Сейчас мы можем выполнять расчеты на гидродинамических моделях, в которых учитываются геомеханические аспекты (с разной степенью точности и достоверности)
- Ввиду большого размера ячеек в них для описания откликов ПРИХОДИТСЯ использовать псевдофункции
- Чтобы отобразить неопределенности, необходимо выполнить несколько стохастических реализаций
- Чтобы определить полный диапазон псевдофункций, нам предстоит много поработать.

Что теперь делать??

Лучшая методика:

- Определите вероятное в настоящее время механическое состояние (неоднородное) в пределах пласта и его эволюцию в геологическом масштабе времени
- Постройте совмещенные гидродинамические и механические модели, которые отражают локальные состояния и позволяют определить эффективные свойства, и введите их в ячейки
- Увяжите модели с данными ГДИС
- Выполните расчеты на полномасштабных гидродинамических моделях (по возможности совмещенных).
- Определите возможное влияние больших отклонений эффективных свойств

Оптимизм, смущение, страх

- На некоторых участках отдельных пластов трещины распределены таким образом, что их взаимодействие с присутствующими в пласте флюидами с учетом теплового воздействия и механического состояния можно описать с помощью псевдостатических гидродинамических моделей

Это успокаивает

- В других случаях строго нелинейные взаимодействия можно отобразить с помощью резких изменений эффективных свойств, и для этого нам нужны совмещенные модели (или информация, полученная по этим моделям ...)

Это смущает или пугает

Заключительное слово о напряжении

- Напряжение - это состояние, и поэтому это интенсивный параметр, и он не может длиться долго. В действительности, он в физическом понимании не существует.
- Напряженное состояние не может оставаться постоянным после того, как происходит относительная деформация.
- Взгляды и понятия, основанные на постоянстве напряженного состояния, неприменимы в пластовых условиях.

Если слово Stressed (напряженный) прочитать задом наперед, получатся просто Desserts (десерты)...

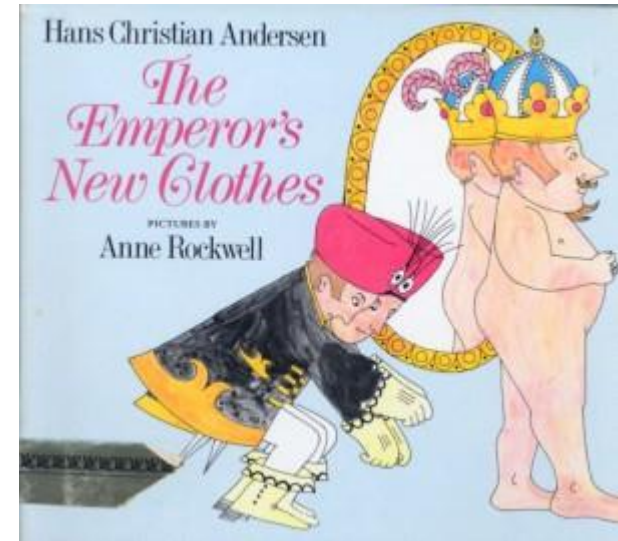


www.artgroup.com

Запомните: в большинстве случаев, когда вы говорите "напряжение", вы можете с не меньшей уверенностью сказать "относительная деформация", потому что при региональной относительной деформации xxxx

Развенчивание мифов

- Широко распространенные эмпирические правила не подкреплены результатами обоснованного анализа
- Они превратились в **мифы**
- Я решил осмелиться задать несколько простых вопросов
- Результаты заставляют усомниться в правильности прогнозов.
- И как следствие, нам открывается неприглядный зад голого короля
- ...



www.4thmedia.org

Ганс Христиан Андерсен

*Новое
платье короля*

Запомните: само напряжение не перемещается, хотя может меняться его распределение

Заключение

- В трещиноватом пласте в движении находятся не только флюиды (не застыли на месте и горные породы!)
- Геомеханика задействована во всех процессах от создания коллектора до прекращения его разработки, причем особенно важно учитывать принципы геомеханики на этапе эксплуатации
- Не заблуждайтесь на этот счет и не считайте, что учитываете принципы геомеханики, если выполняете несколько расчетов, исходя из предположения о том, что напряжение остается неизменным
- Вы можете воспользоваться уже наработанным опытом и знаниями, приобретенными в этой области. Но вам нужно понимать, что вам дадут и во что обойдутся такие сложности.

Конец

Хочу выразить благодарность коллегам, студентам, интервьюерам и критикам, которые в течение многих лет настойчиво требовали, чтобы я продолжал развивать свои представления о трещиноватости и геомеханике.

Использованная литература:

- Baghbanan, A. и Jing, L. 2008. Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length и aperture. *International Journal of Rock Mechanics u Mining Sciences*, **45**, 1320-1334.
- Couples, G.D. 2014. Geomechanical impacts on flow in fractured reservoirs, *In*: Spence, G.H., Redfern, J., Aguilera, R., Bevan, T.G., Cosgrove, J.W., Couples, G.D. & Daniel, J.-M. (eds) *Advances in the Study of Fractured Reservoirs*. Geological Society, London, Special Publications, **374**, <http://dx.doi.org/10.1144/SP374.17>
- Flores, M. Davies, D., Couples, G. и Pallson, B. 2005. Stimulation of geothermal wells: can we afford it? *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Ankara, Turkey.
- Hall, S.A., Lewis, H. и Macle, X. 2007. Improved seismic identification of inter-fault damage via a linked geomechanics seismic approach, . *In*: Lewis, H. и Couples, G.D. (eds) *Relationships Between Damage u Localization*, Geological Society of London, Special Publications, **289**, 187-207.
- Lin, C.T. 1995. Extensions of the discontinuous deformation analysis for jointed rock masses и other blocky systems. PhD thesis, University of Colorado.
- Questiaux, J.-M., Couples, G.D., Ruby, N. 2010. Fractured reservoirs with fracture corridors. *Geophysical Prospecting*, **58**, 279-295, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00810.x
- Ma, J. & Couples, G. D. "Nonlinear analysis of fluid flow behaviour и flow control factors in fractured systems using support vector machine", ECMOR X: 10th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, 4-7 September 2006, Amsterdam, the Netherlands.
- Рейнольдс, М.А. 2004. *Load-sensitive fluid flow through fracture-matrix systems*. PhD thesis, Heriot-Watt University, 239p.
- Рейнольдс, М.А., Couples, G.D., Lewis, H. и Pickup, G.E. 2007. Localization processes in a coupled hydrogeomechanically-sensitive fractured system. *In*: Lewis, H. и Couples, G.D. (eds) *Relationships Between Damage u Localization*, Geological Society of London, Special Publications **289**, 209-225.
- Rouainia, M., Lewis, H., Pearce, C., Bicanic, N., Couples, G.D., и Рейнольдс, М.А. 2006. Hydro-geomechanical modelling of seal behaviour in overpressured basins using discontinuous deformation analysis. *Engineering Geology* **82** 222-233.
- Shi, G.H. и Goodman, R. 1998. Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis. *International Journal for Numerical u Analytical Methods in Geomechanics*, **13**, 359-380.

Distinguished Lecturer Program

Ваш отзыв важен для меня

**Зайдите на сайте в раздел конкурса на лучший отзыв
на выступление в рамках программы Выдающиеся
лекторы и заполните бланк отзыва на эту
презентацию**

<http://www.spe.org/dl/>



Общество инженеров-нефтяников
Программа выдающихся лекторов
www.spe.org/dl

