

*Значимость краш-тестов
для оценки керамических
пропантов и ОПР в
нетрадиционных
коллекторах*

Содержание

- Необходимость критического рассмотрения краш-теста по API.
- 10 мифов – SPE 119242
 - Как необходимо и нельзя использовать результаты краш-тестов!
- Рекомендации по оценке пропантов
- Что имеет значение при оценке качества пропанта
- Дебит скважин после ГРП при применении различных пропантов - ОПР

Стадии разработки



Какие методы исследования использовать при разработке пропантов?

- Тестирование согласно ISO 13503-2 (2006)
- Определение метода удобного пользователю для быстрой качественной оценки различных смесей сырья
- Где проводить тестирование для проверки
- Внешние данные (совместимость с жидкостями ГРП)

CARBO*RosLite*

- В 2010 ТНК-ВР сделана запрос Карбо на разработку пропанта «Рябчик»
- Изначально тестирование проводилось в лаборатории Карбо в г.Хьюстон
- Новый продукт был разработан в России, производство с 2013,
CARBO*RosLite*

Как отличать потенциально хорошую смесь сырья

- Для быстрого ответа - краш-тест, удельный вес и растворимость в кислотах
- Провести полный API тест на потенциально пригодных смесях сырья
- Определить лучшую смесь сырья



ПРОБЛЕМА!

Что если результаты краш-тестов недостоверные?

- По опыту и статье SPE 119242 мы знаем, что краш-тесты имеют ограниченное применение или бесполезны для оценки проводимости
- Самое главное – проводимость, как прямой индикатор дебита
- Технически невозможно провести тестирование на проводимость на всех смесях сырья

ТНК-ВР QAQC для облегченных пропантов

Fracture Closure Stress (psi/MPa)	Proppant Pack Conductivity (mD/ft)			
	10/14	12/18 - 12/20	16/20 - 16/30	20/40
2000 / 13,79	no data	35708	18270	8352
4000 / 27,58	no data	21091	12795	6538
6000 / 41,37	no data	8442	6445	4055
8000 / 55,16	no data	3775	2806	2324
10000 / 68,95	no data	1613	1198	1241
12000 / 82,74	no data	200	225	60
14000 / 96,53	no data	90	154	38

Test Pressure (psi/MPa)	Proppant Crush Test (% Fines)			
	10/14	12/18 - 12/20	16/20 - 16/30	20/40
5000 / 34,47	8,0	3,0	2,0	1,0
7500 / 51,71	22,0	19,8	13,0	6,0
10000 / 68,95	38,0	35,0	21,0	12,0
12500 / 86,18	48,0	43,0	33,0	24,0
15000 / 103,4	no data	49,0	39,0	31,0

Краш-тест vs проводимость

- *Пожалуйста, посмотрите на предоставленные таблицы...*
- Разрушение CARBORosLite в 2 раза выше, чем спецификация, НО проводимость такая же

SPE 119242

Как необходимо и нельзя использовать результаты краш-тестов – 10 основных мифов

T. T. Palisch, M. Chapman, R. Duenckel,
S. Woolfolk, CARBO Ceramics, Inc.
M. C. Vincent, Insight Consulting



Протоколы краш-тестов

- Краш-тест - дешевый, быстрый, информативный метод.
 - API RP56 (1983) & RP60 – усовершенствован в ISO 13503-2 (2006)
 - “совершенствование качества...поставленных пропантов”
 - “позволяет...сравнить физические свойства”
 - Изначально разработан для оценки качества песка
 - “Результаты краш-теста” и выбор пропанта
 - “компетентный технический анализ....необходим для их применения в конкретных ситуациях”
 - SPE 11634 – Сравнение проводимости не может быть сделано на основе краш-теста
- **Многие все еще выбирают пропант по результатам краш-теста ***

Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия

ISO 13503-2 Процедура краш-теста

- Пропант предварительно просеивается для удаления частиц, находящихся вне диапазона размерности.
- Сухой пропант помещается в стальную ячейку ~4 фунт/фут² (эквивалент песка)
- Тестирование при комнатной температуре
- Пропант равномерно распределяется по поверхности ячейки
- Прикладывается постоянная равномерная нагрузка
- Постоянное давление сохраняется в течение двух минут
 - После теста пропант просеивается. В отчете указывается весовой процент частиц, прошедших через сита и попавших в поддон.
- Для пропанта 16/20 частицы < 20 меш указываются как “пыль”
- Для пропанта 30/50 частицы < 50 меш указываются как “пыль”



Условия теста реалистичны?

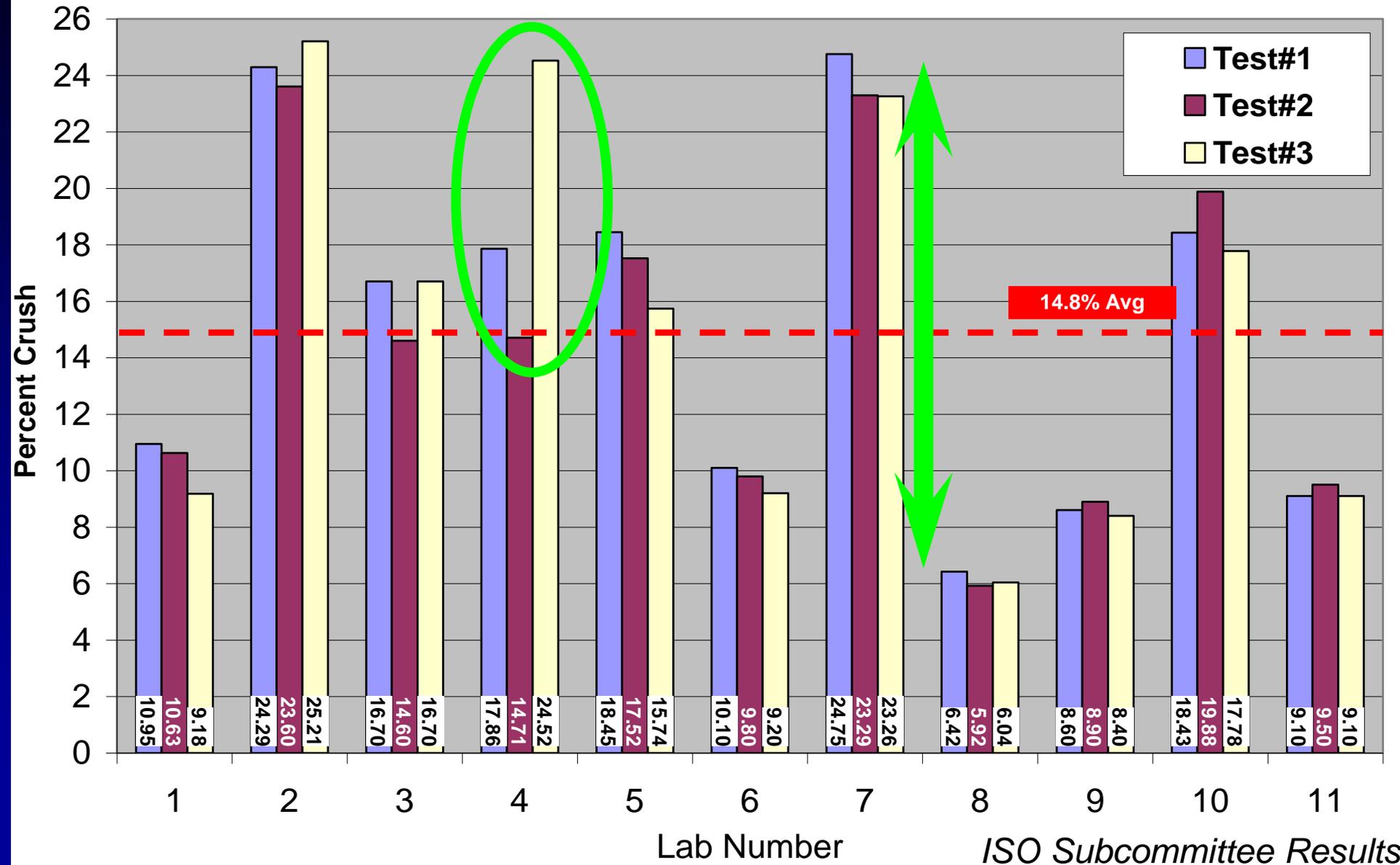
- Пропант предварительно просеян
- Пропант помещен в ячейку (толщина слоя ~ 1/2")
 - Песок / песок с полимерным покрытием / облегченные пропанты ~4 фунт/фут²
 - Пропанты средней плотности ~4.8 фунт/фут²
 - Бокситы ~5.2 фунт/фут²
- Гладкая стальная вставка - без вдавливания?
- Пропант “утрамбован”
- Образец сухой, температура комнатная
- Давление 2000 psi/min, выдержано в течение 2 минут
- Только частицы прошедшие через нижнее сито в поддон считаются “пылью” или “разрушенной высевкой”

Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые

Результаты тестов повторяемы?

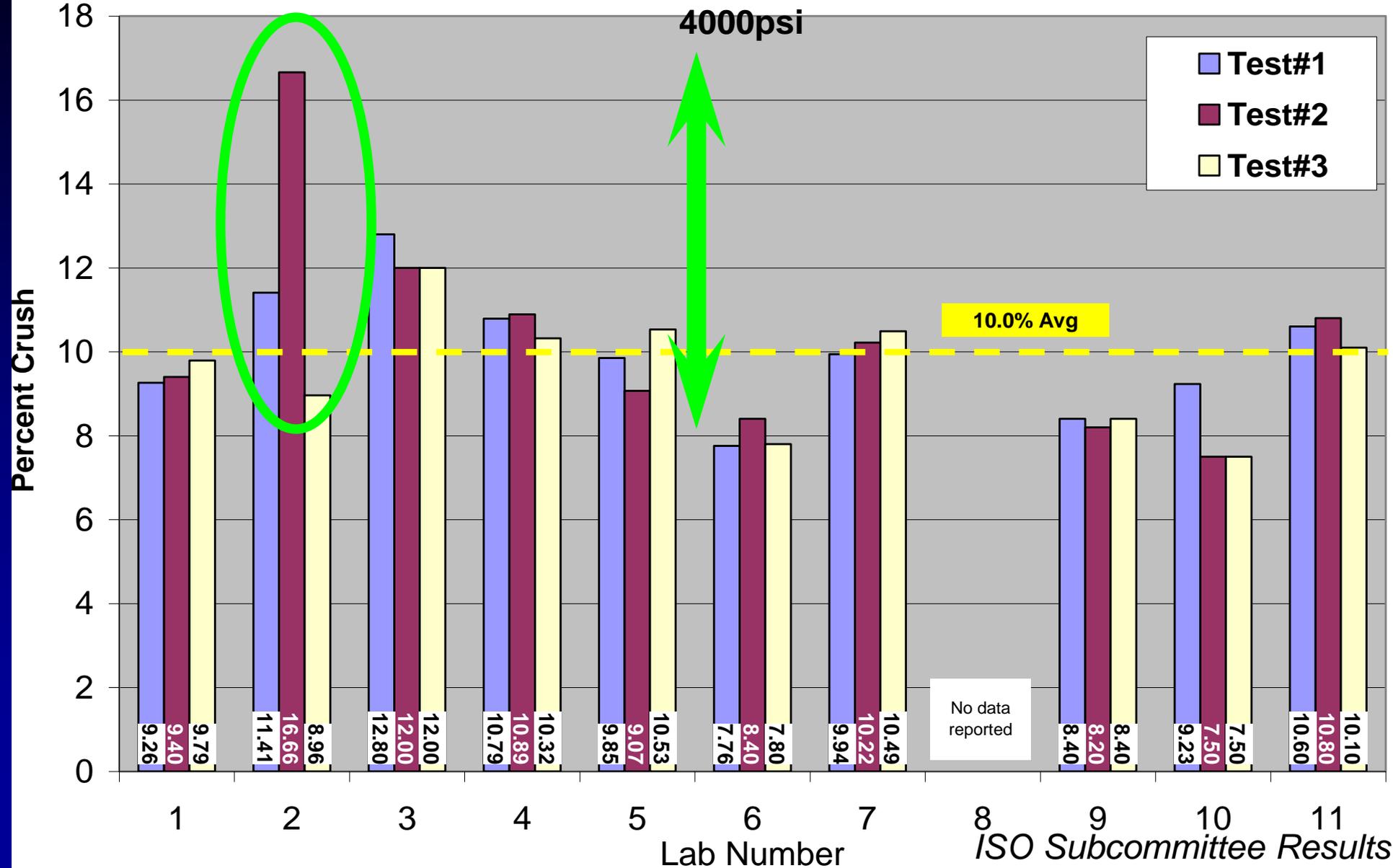
16/30 Brown Sand Hand Loaded Weight Percent Crush at 4000psi



Результаты тестов повторяемы?

16/30 Brown Sand Mechanical Loaded Weight Percent Crush at

4000psi



Результаты тестов повторяемы/надежны?

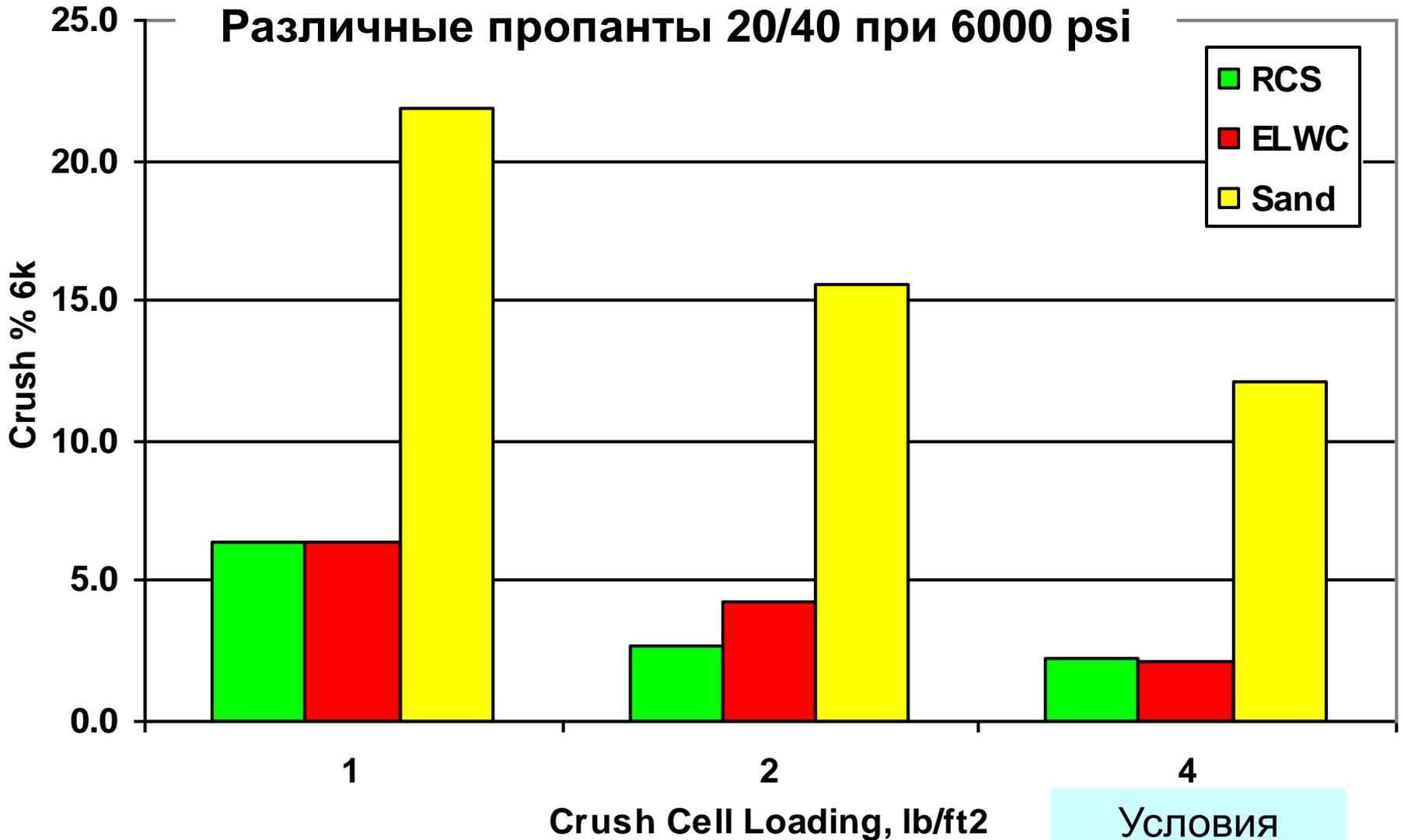
Загрузка пропанта в ячейку критична

- “различия в результатах краш-тестов....связаны с методикой загрузки пропанта в ячейку и создания нагрузки...”
- Значительные дискуссии продолжаются в комитете ISO и StimLab направлены на снижение расхождений результатов тестирования
 - Техника и методика тестирования представляется основной причиной различий результатов
 - От лаборатории к лаборатории, от специалиста к специалисту, от оборудования к оборудованию

Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта

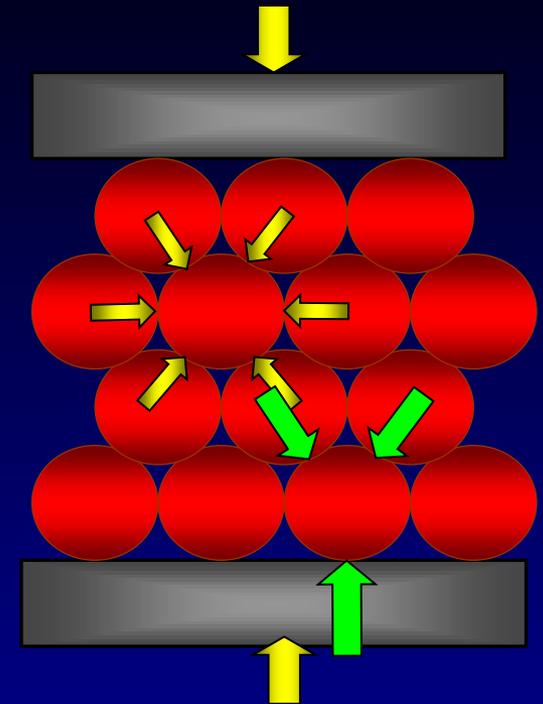
Ширина трещины влияет на разрушение?



Условия
краш-теста
по ISO

Ширина трещины влияет на разрушение?

- Нагрузка на внутреннее зерно в упаковке пропанта равномерна
- У внешнего зерна площадь контакта меньше. Нагрузка на зерно выше.
- Разрушаемость пропанта значительно увеличивается с уменьшением количества слоев

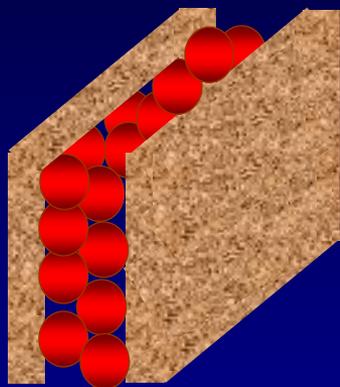


- Для пропанта 20/40, с упаковкой примерно в 24 слоя в стандартном краш-тесте с загрузкой 4 фунт/фут²
 - 8% зерен находятся во внешнем слое
- Для пропанта 20/40, с упаковкой примерно 6 слоев в краш-тесте с загрузкой 1 фунт/фут²
 - 33% зерен находятся во внешнем слое

Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц

Однородное размещение пропанта?

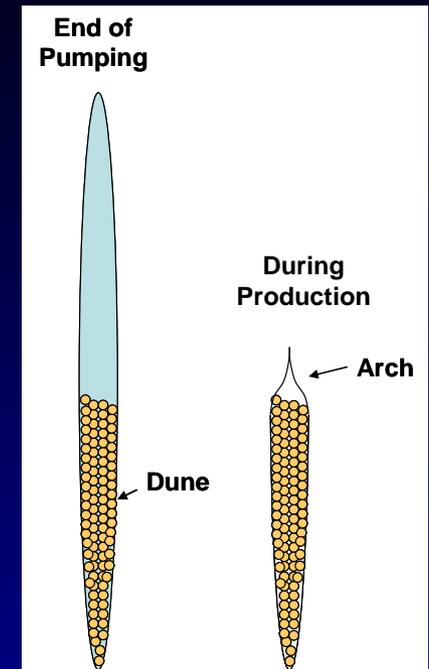
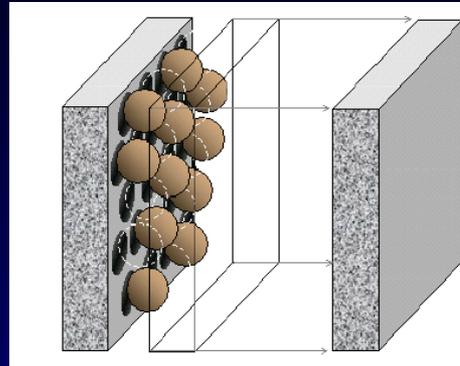
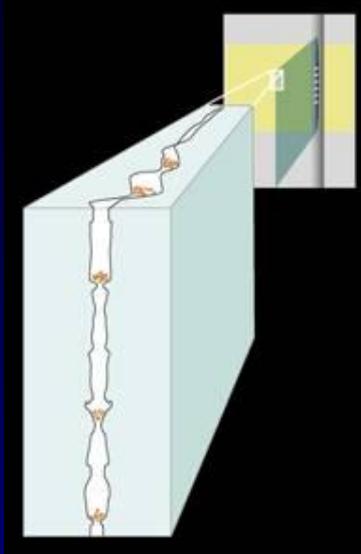


Эта трещина непрерывна по горизонтали на десятки и сотни метров?



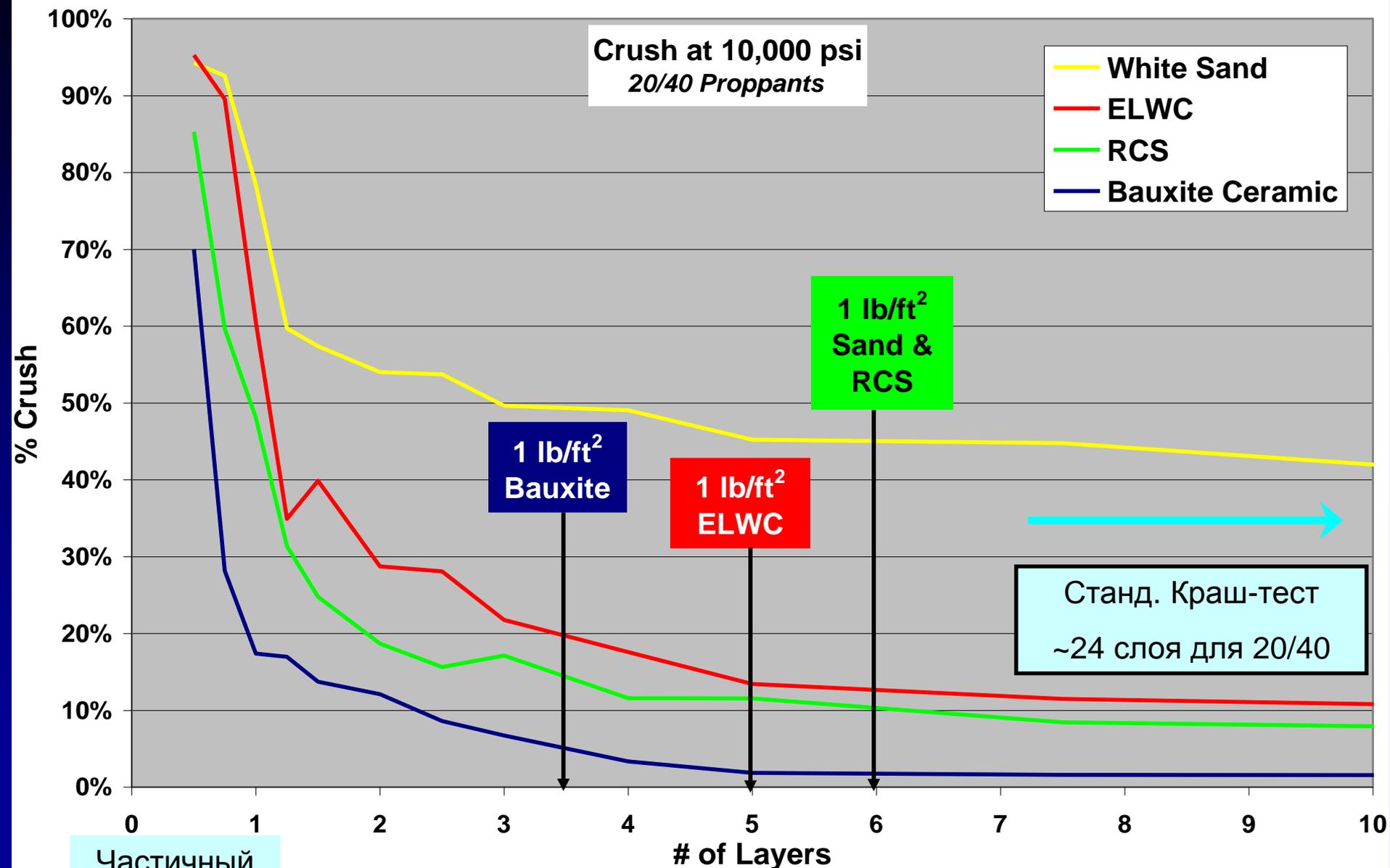
Пустоты, пропантные пачки, неравномерное распределение?

Возможное расположение пропанта



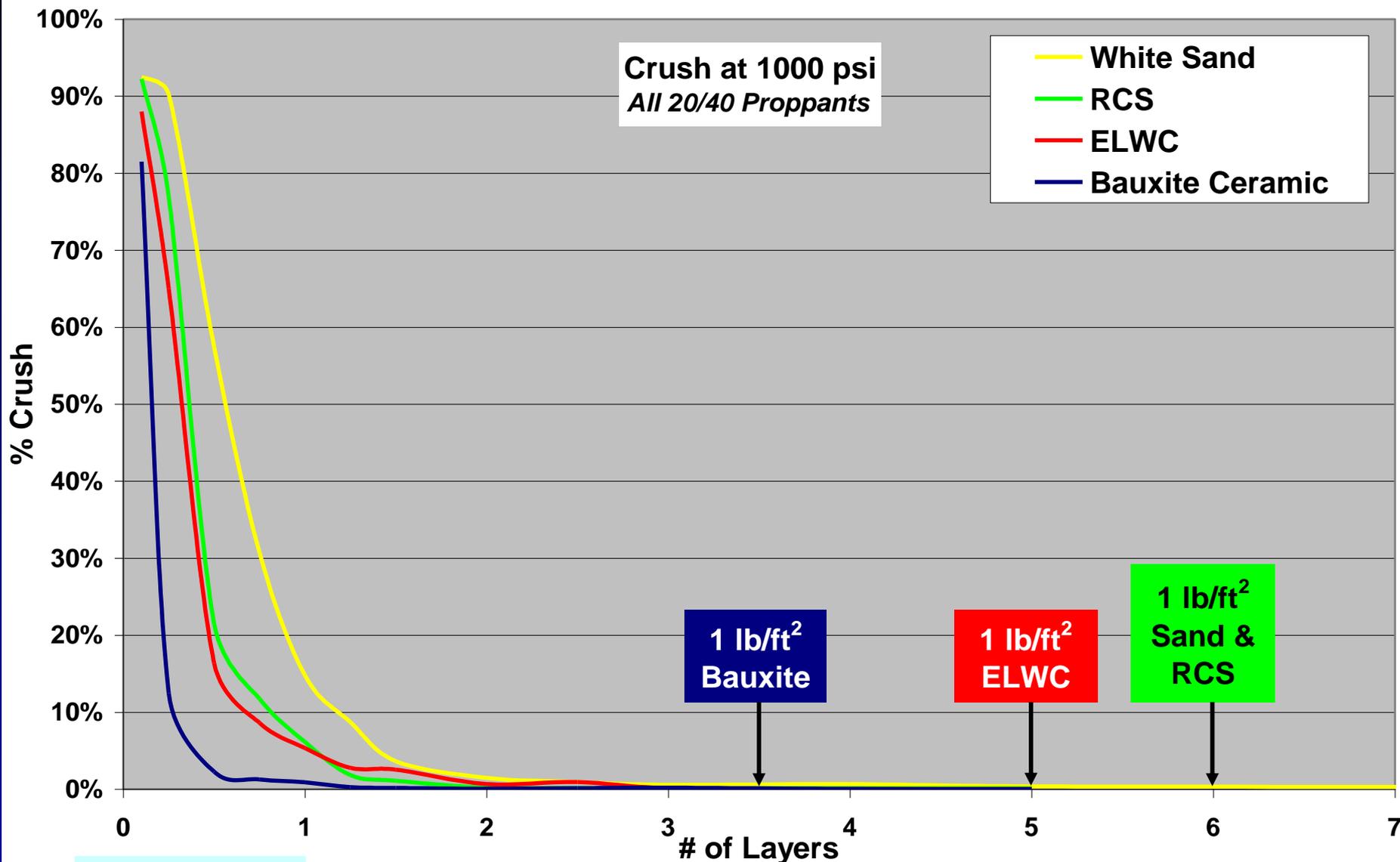
- 45 тн пропанта 20/40 содержит ~125 млрд. зерен
- Практически любое расположение пропанта, которое мы можем предположить, может существовать в трещине
- Нагрузка на пропант в трещине выше, чем при проведении лабораторных тестов в “идеальных” условиях
- Пропускная способность пропантной пачки ограничена проводимостью участка трещины с минимальным количеством слоев, а не имеет среднее значение

Разрушение vs #слоев при 10,000 psi



Частичный
МОНОСЛОЙ

Разрушение vs #слоев 1000 psi

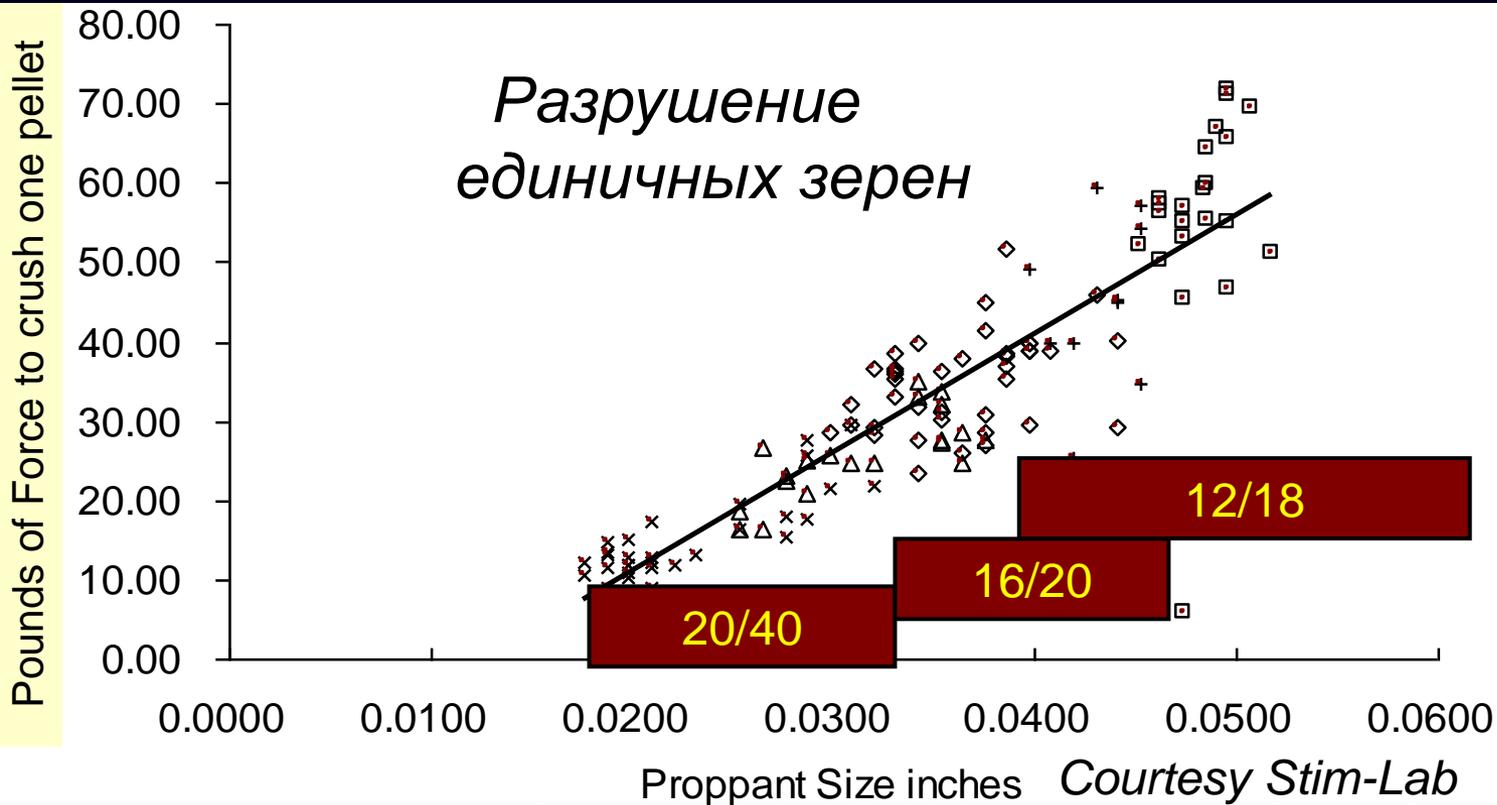


Частичный
МОНОСЛОЙ

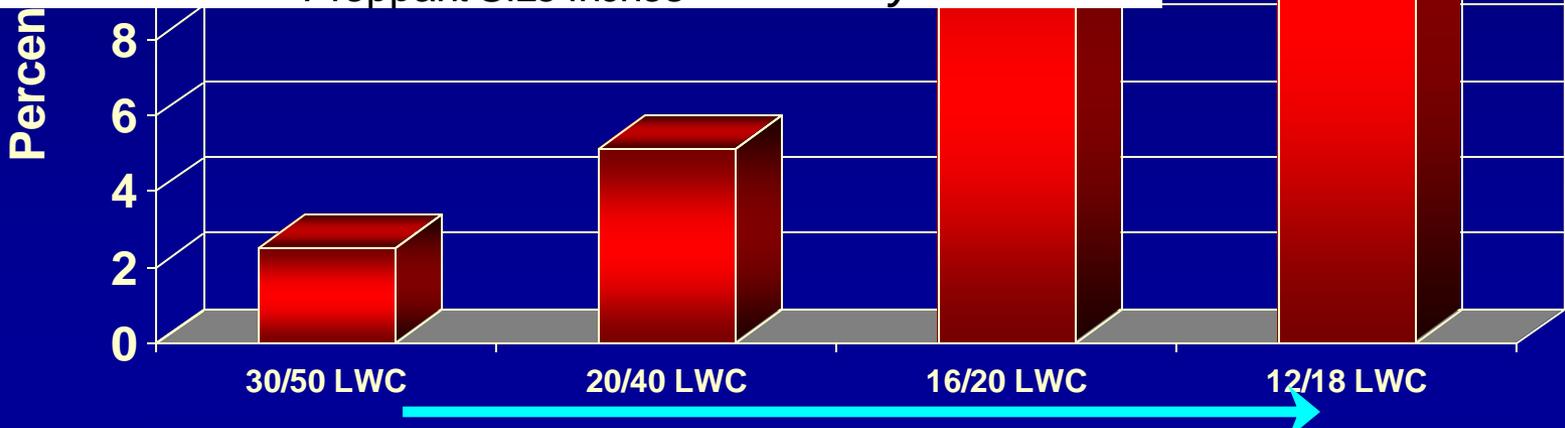
Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц
5. Мелкий пропант более крепкий

Крупные зерна слабее мелких?

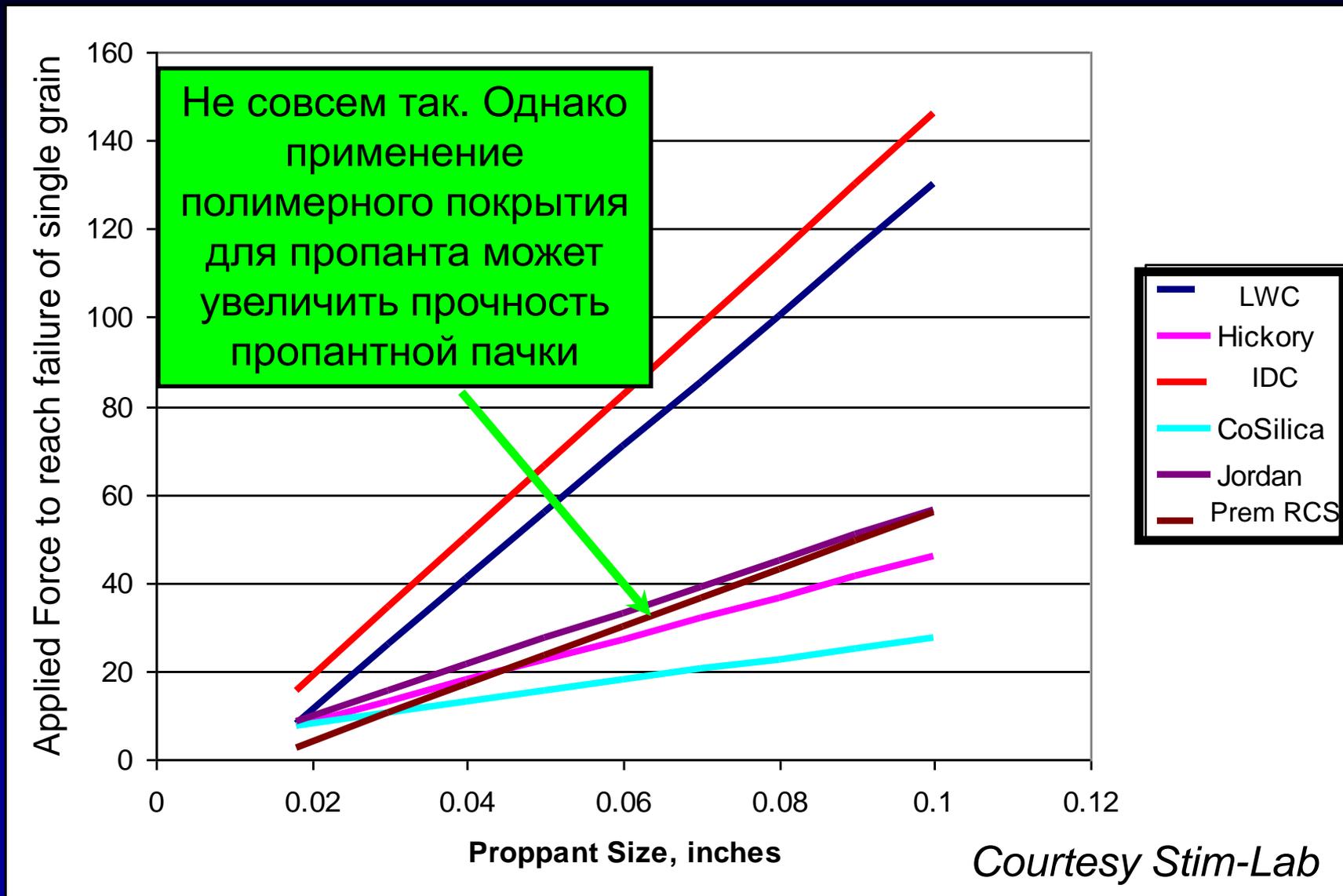


НЕТ!

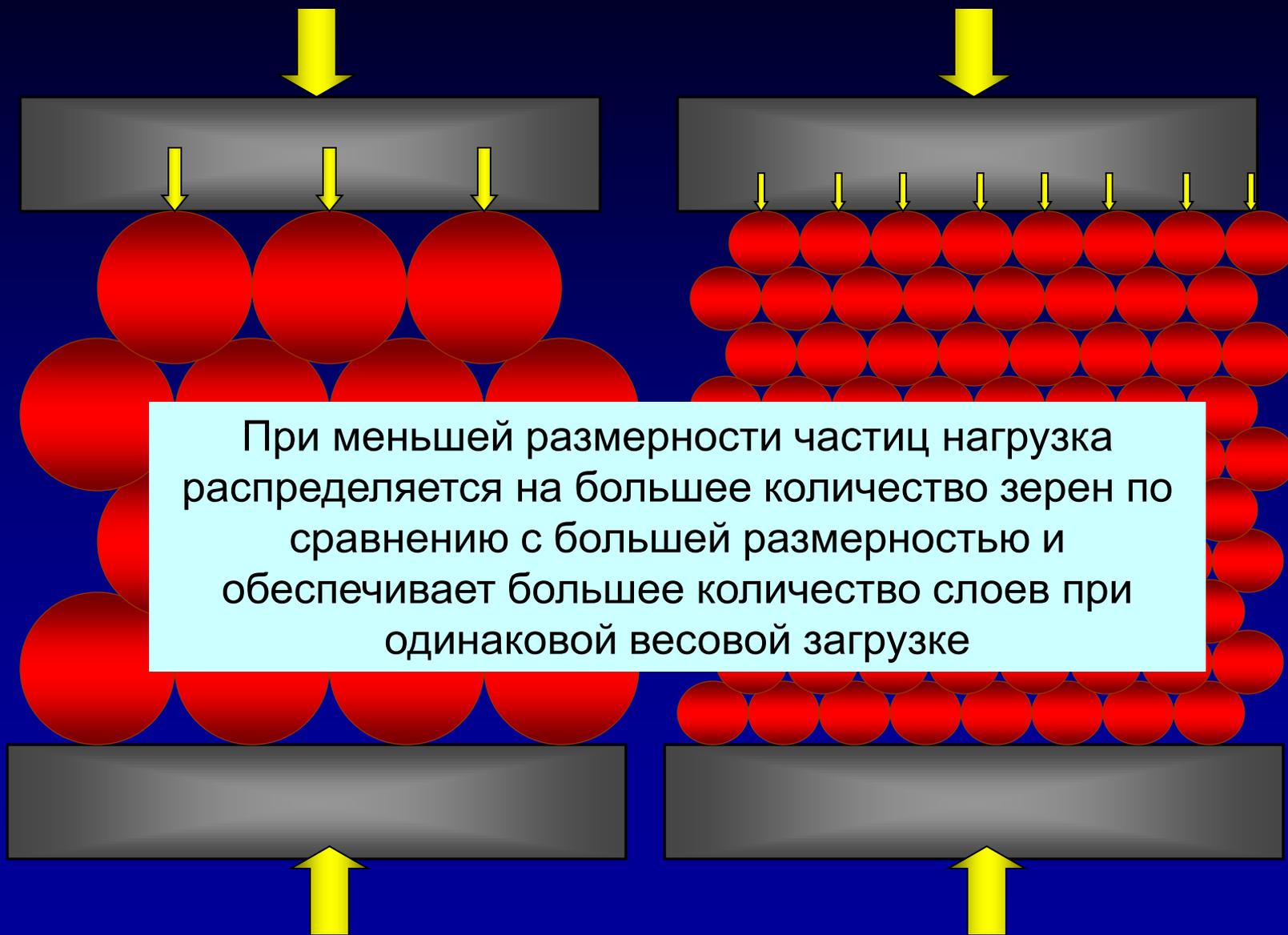


Разрушаемость увеличивается с увеличением размера зерна

Для всех типов пропанта, у больших зерен - большая индивидуальная прочность.



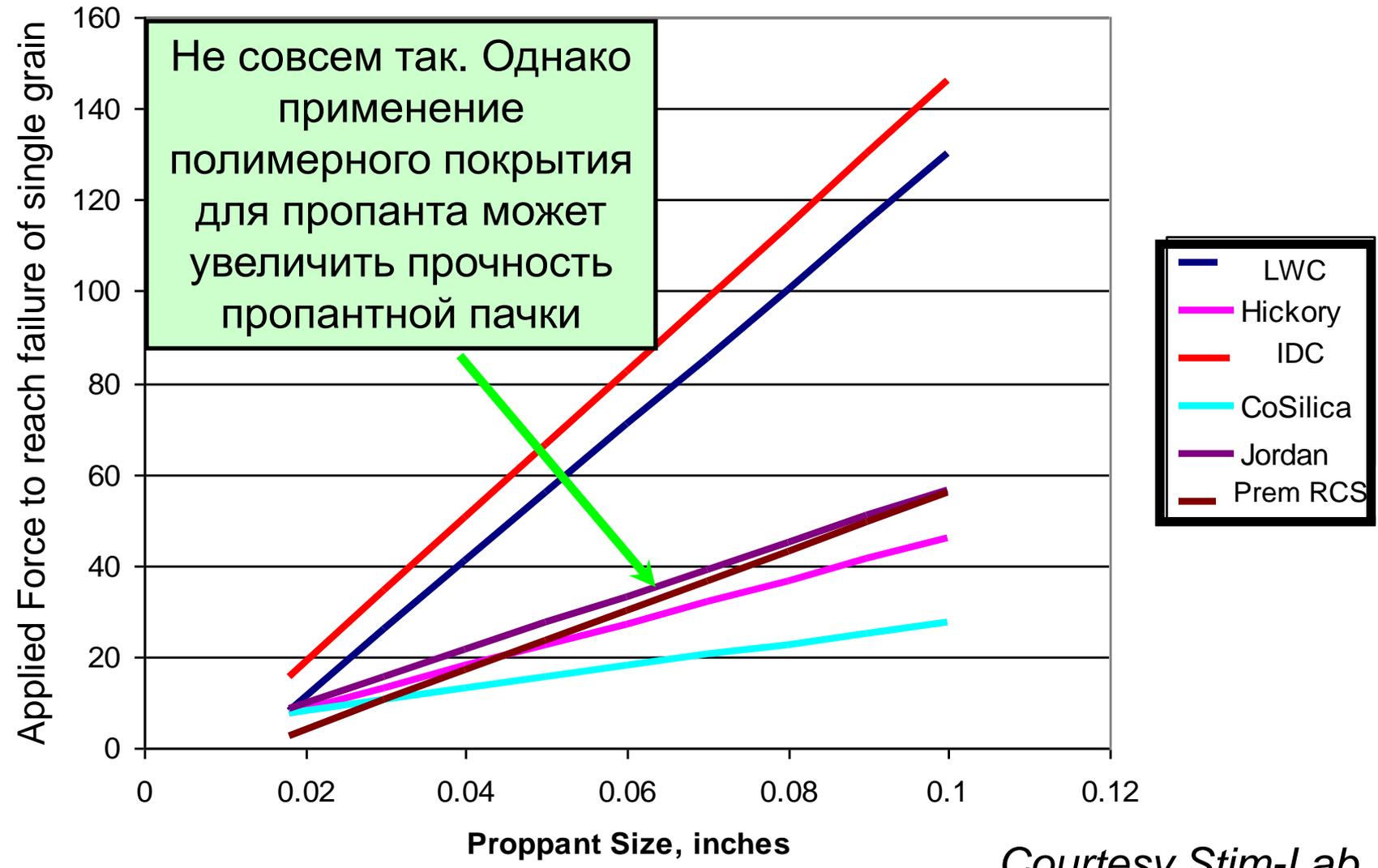
“Сила в количестве”



Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц
5. Мелкий пропант более крепкий
6. Полимерное покрытие повышает крепость зерен пропанта

Применение смолы увеличивает прочность частиц?



Courtesy Stim-Lab

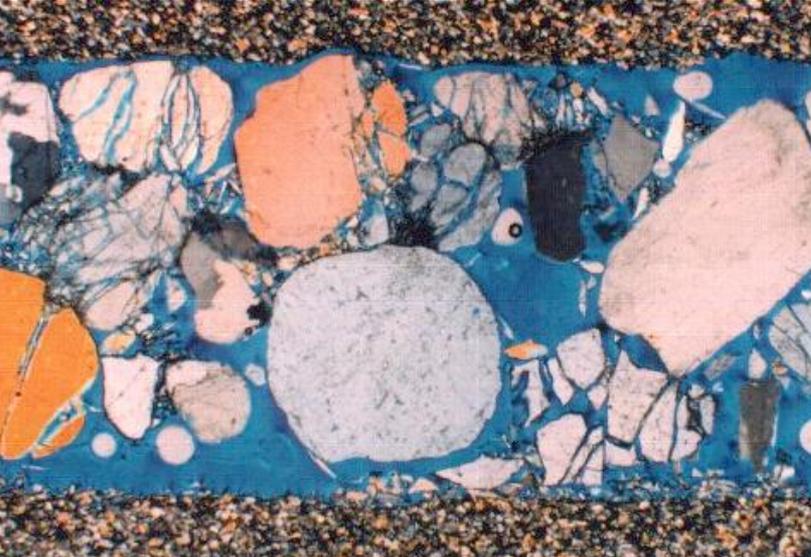
Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц
5. Мелкий пропант более крепкий
6. Полимерное покрытие повышает крепость частиц пропанта
7. Все пропанты разрушаются одинаково

Все пропанты разрушаются одинаково??

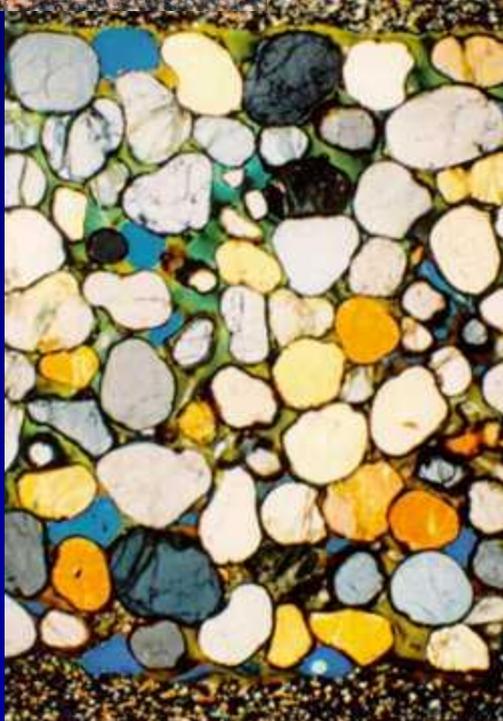
Когда разрушается...

- Песок крошится как стекло
- Керамика трескается как кирпич
- Полимерно покрытые продукты деформируются, расколотые частицы удерживаются



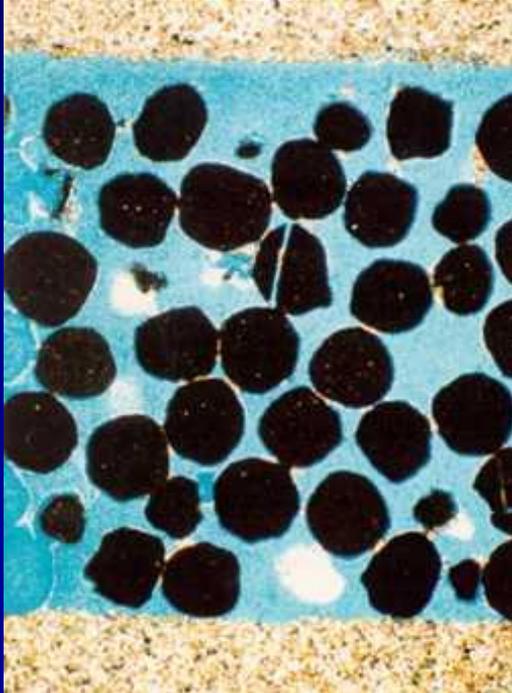
Коричневый
песок при 6000
psi.

This micrograph shows brown sand particles under 6000 psi. The particles are irregular and fragmented, with a blue matrix filling the spaces between them. The overall appearance is that of a highly fractured and broken material.



Полимерно
покрытый
песок при
8000 psi.

This micrograph shows polymer-coated sand particles under 8000 psi. The particles are more rounded and uniform in size compared to the brown sand, with a blue matrix. The coating appears to hold the particles together, preventing them from fragmenting completely.

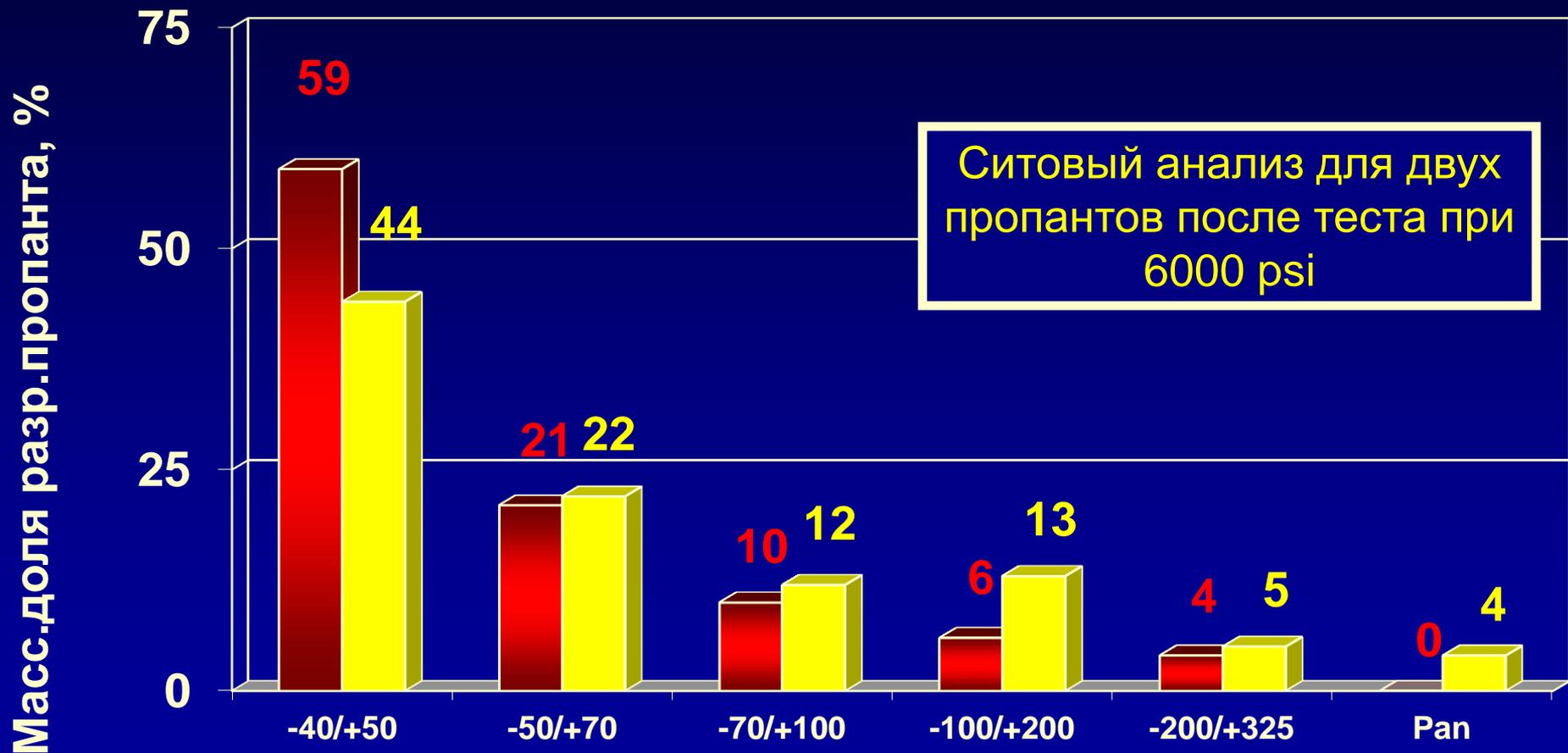


Среднеп
рочный
керамич
еский
пропант
при 8000
psi.

This micrograph shows average ceramic propanant particles under 8000 psi. The particles are dark, rounded, and highly uniform in size, with a blue matrix. They appear to be well-preserved and not significantly deformed or broken.

Все пропанты разрушаются одинаково?

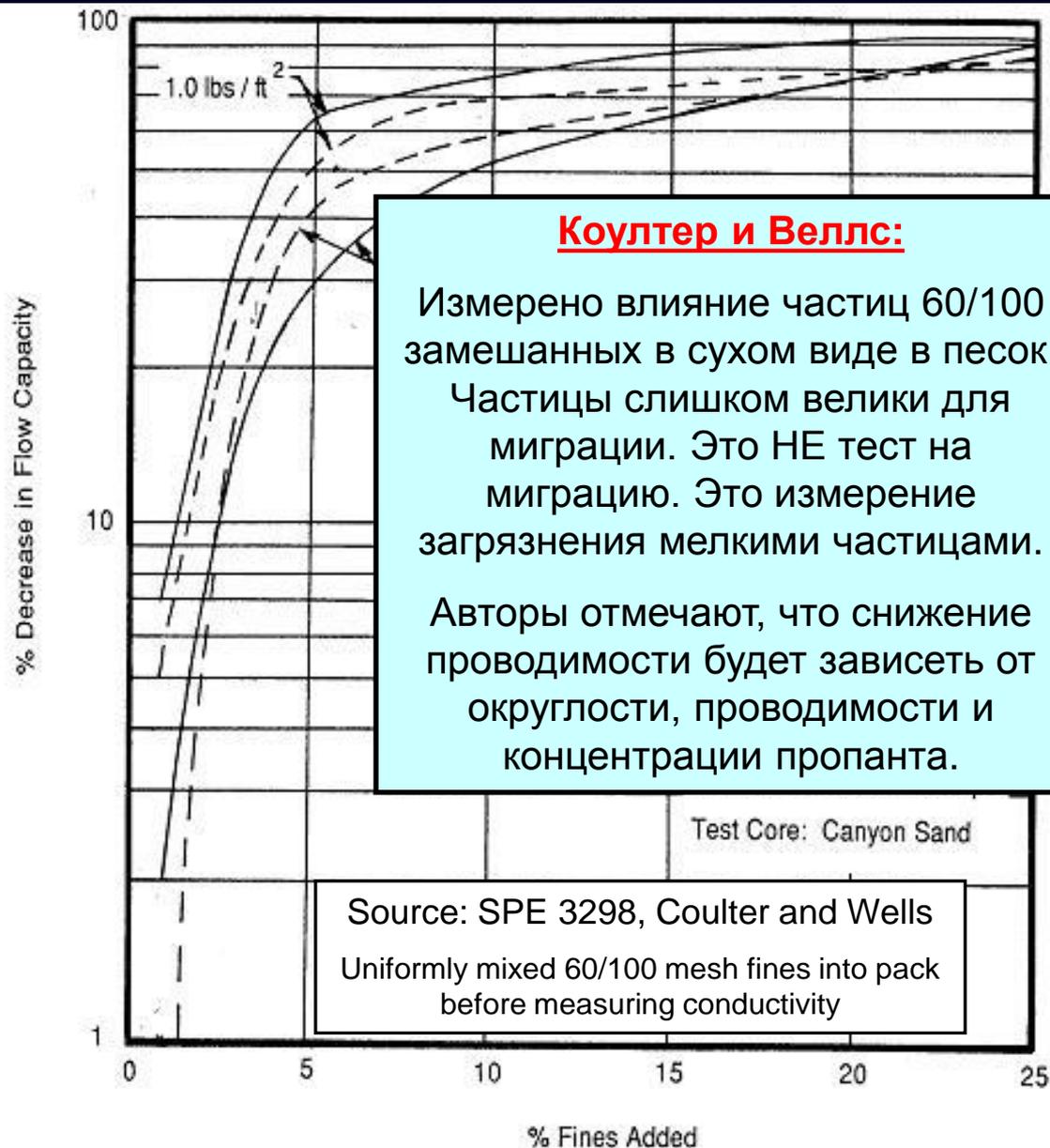
Помните, что 5% разрушенного пропанта 20/40 могут быть 5 гр. размера 50 меш, а могут и 5 гр. размера 200 меш.



Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц
5. Мелкий пропант более крепкий
6. Полимерное покрытие повышает крепость частиц пропанта
7. Все пропанты разрушаются одинаково
8. Разрушение 5% приводит к аналогичному повреждению всех пропантов

Влияние мелких частиц на пропант одинаково?



ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: Есть небольшое сомнение, что большинство частиц, потенциально, могут оказывать влияние на проводимость. В то же время для использования графика нужно допустить:

- Все частицы имеют размерность 60/100
- Поровая геометрия песка 20/40 Brady при 3500psi идентична интересующей
- Частицы одинаково влияют на загрязнение песка, полимерного песка и керамического пропанта
 - Частицы равномерно распределены как при тесте

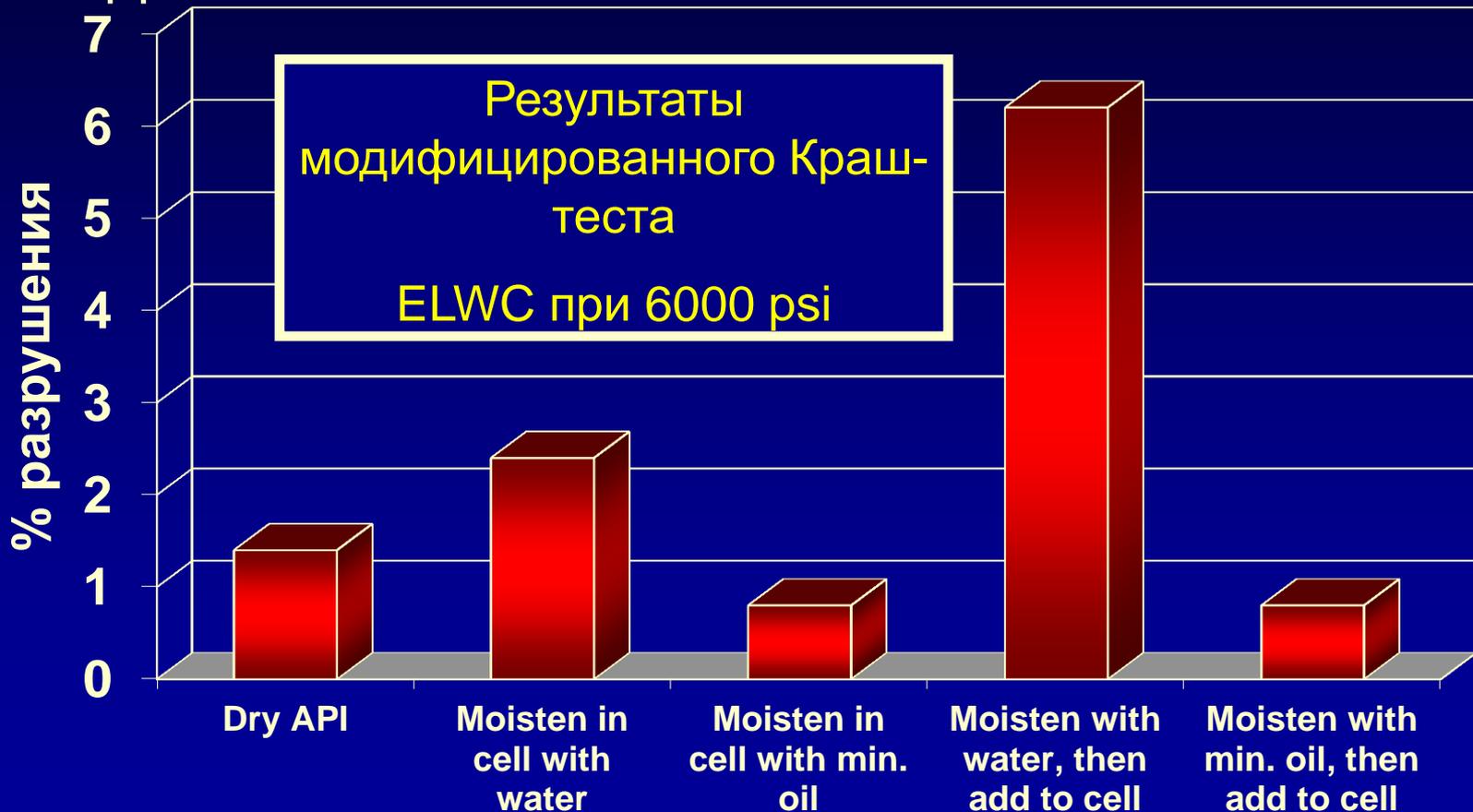
Тест на проводимость проведен для разрушенных материалов/частиц в нагретой, влажной среде, и может показывать что эта взаимосвязь не работает для всех пропантов!

Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц
5. Мелкий пропант более крепкий
6. Полимерное покрытие повышает крепость частиц пропанта
7. Все пропанты разрушаются одинаково
8. Разрушение 5% повреждает все пропанты одинаково
9. Краш-тесты с нагретым/мокрым пропантом дают адекватные результаты

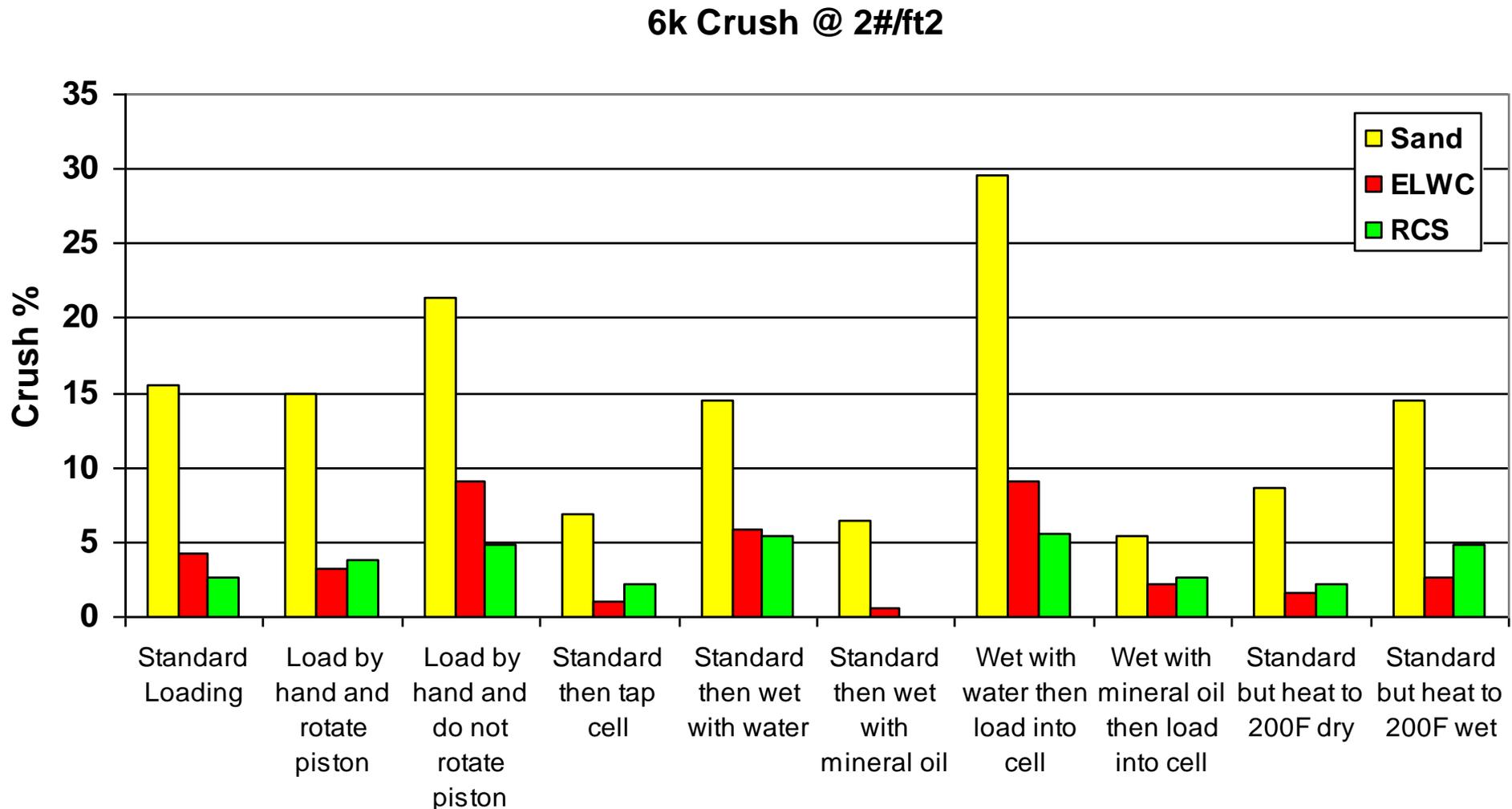
Влияние жидкости

- Тест на сопротивление проводится на сухом образце. Что будет если в пропант добавить жидкость?



Какие условия при тестировании более важные?

Сухой, влажный, нагретый, комнатной температуры, вода или нефть... какие условия более реалистичные?



Source: SPE 119242

Рассмотрим 10 мифов

1. Краш-тест моделирует реальные условия
2. Краш-тесты надежные и повторяемые
3. Ширина трещины ГРП не влияет на разрушение пропанта
4. Равномерное распределение частиц
5. Мелкий пропант более крепкий
6. Полимерное покрытие повышает крепость частиц пропанта
7. Все пропанты разрушаются одинаково
8. Разрушение 5% повреждает все пропанты одинаково
9. Краш-тесты с нагретым/мокрым пропантом дают адекватные результаты
10. Краш-тесты коррелируют с проводимостью

Есть ли корреляция между краш-тестом и проводимостью?

Различия

Тест на проводимость

Проба как есть

Эквивалентно массовой загрузке 2 фунт/фут²

Песчаник

Движение жидкости через пачку

Возрастающая температура (от 150° до 350° F)

Давление оказываемое в течении 50 часов минимум

Краш-тест

Из пробы удалены частицы вне диапазона

Эквивалентно объемной загрузке ~4 – 5.2 фунт/фут²

Металл

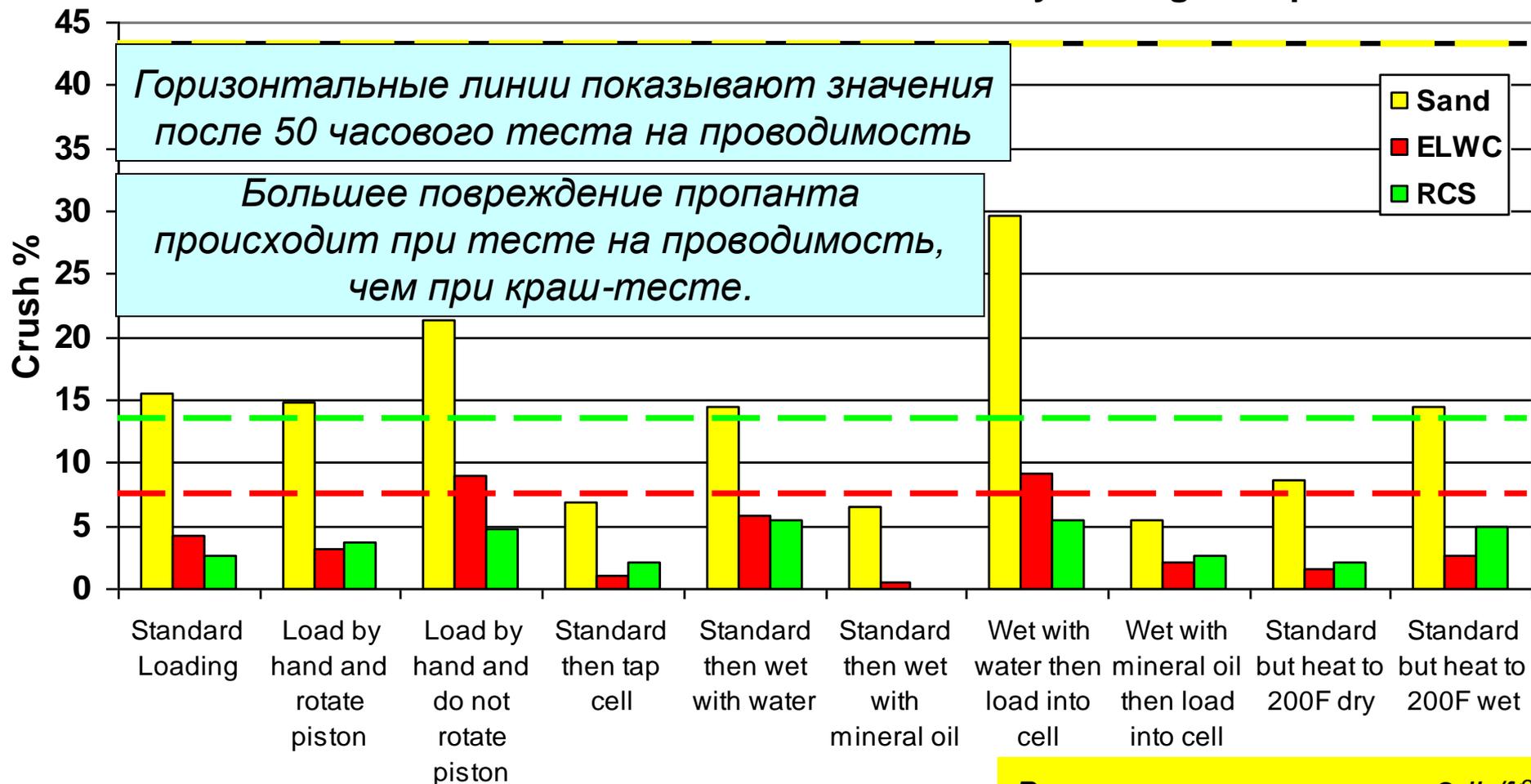
Сухая среда

Комнатная температура

Давление оказываемое в течении 2 минут

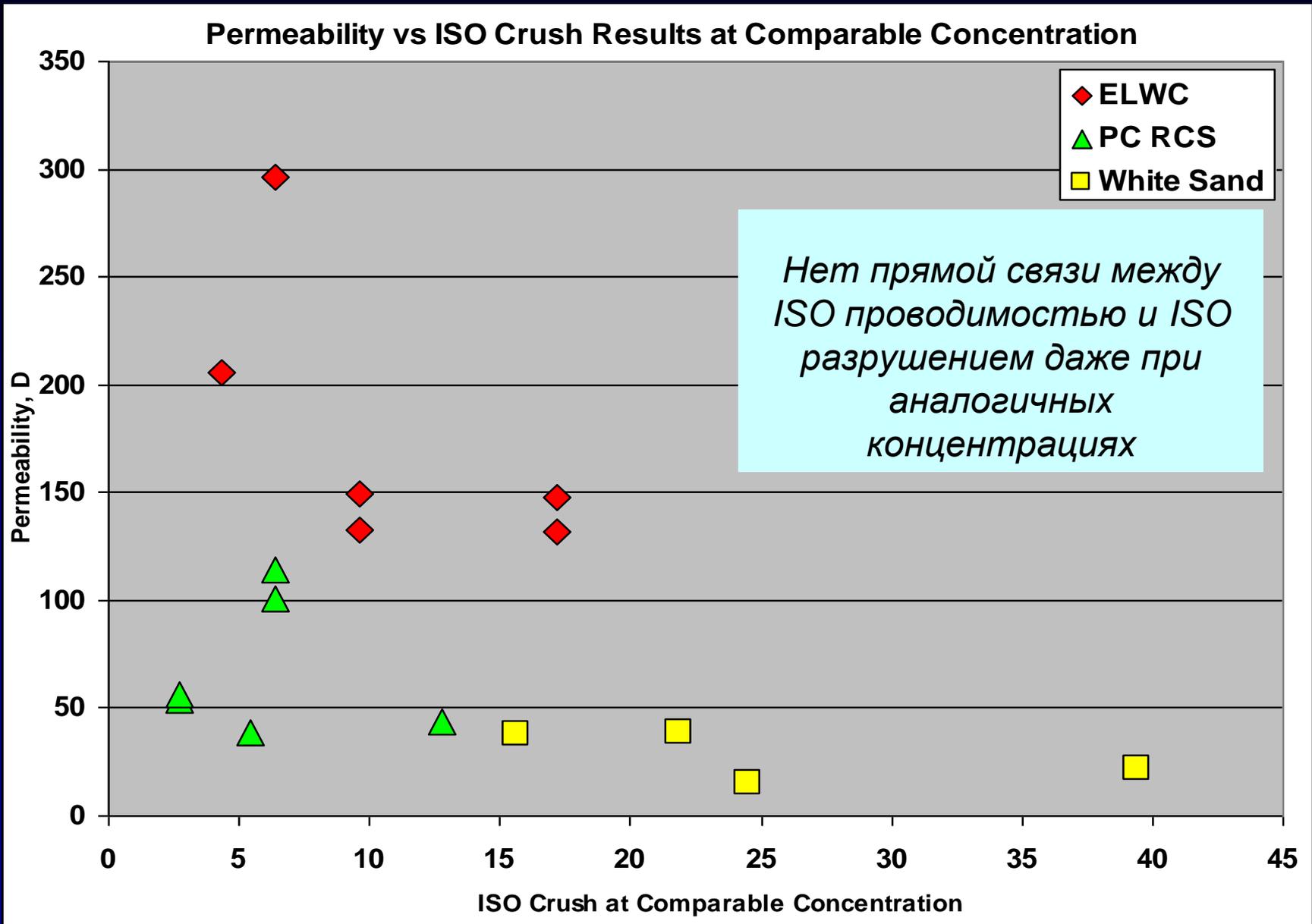
Существует ли связь между повреждением пропанта при тесте на проводимость и повреждениями при краш-тесте?

6k Crush Results vs Crush after Conductivity Testing at 6k psi



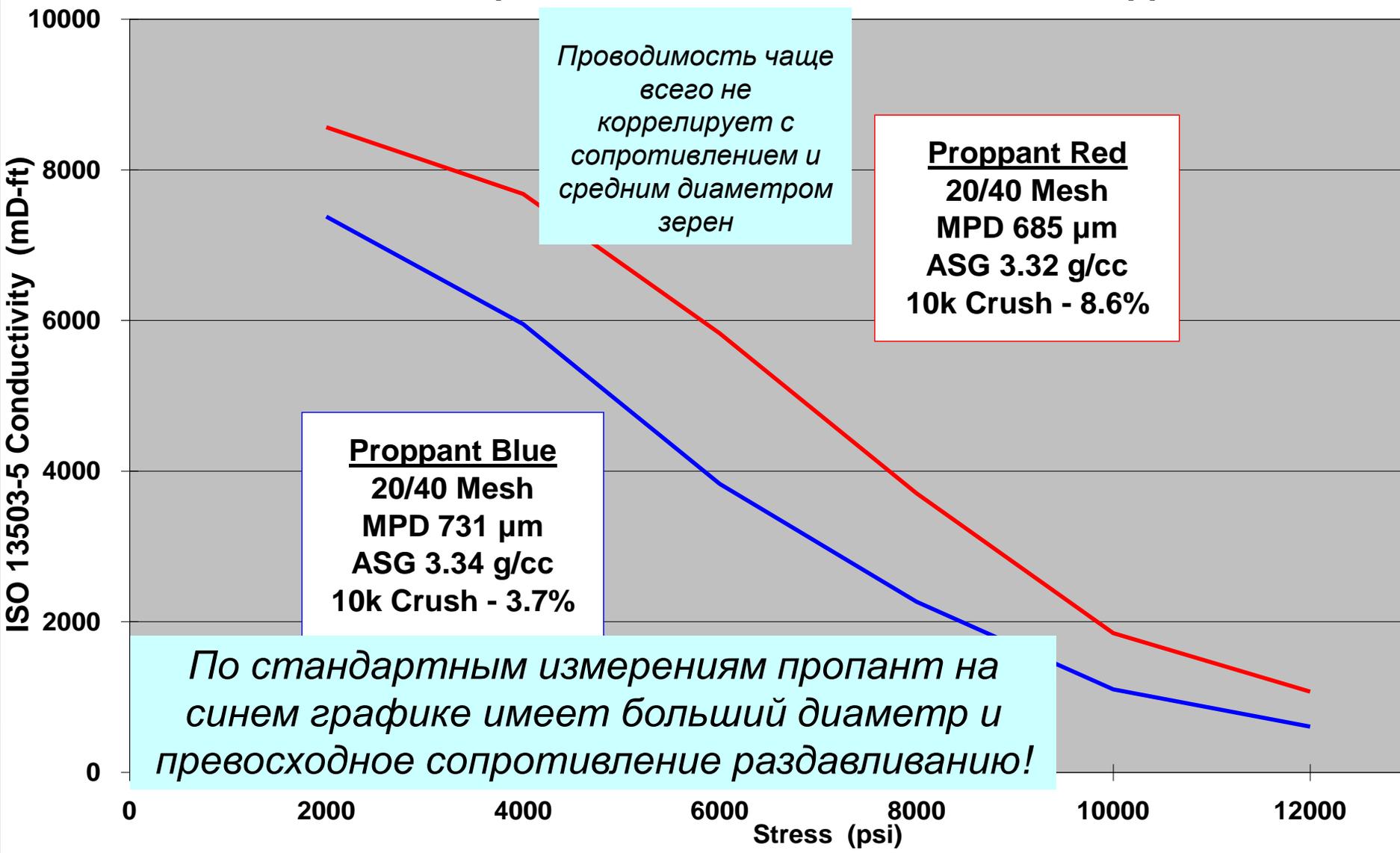
Все тесты при загрузке 2 lb/ft²

Есть ли корреляция между разрушением и проводимостью?



Есть ли корреляция между разрушением и проводимостью?

Comparison of Two Different 20/40 IDC Proppants



Проводимость чаще всего не коррелирует с сопротивлением и средним диаметром зерен

Proppant Red
20/40 Mesh
MPD 685 μm
ASG 3.32 g/cc
10k Crush - 8.6%

Proppant Blue
20/40 Mesh
MPD 731 μm
ASG 3.34 g/cc
10k Crush - 3.7%

По стандартным измерениям пропант на синем графике имеет больший диаметр и превосходное сопротивление раздавливанию!

Практическое применение краш-тестов.

- В производстве
 - КАРБО проводит более 70 000 тестов в год!
 - За счет автоматизации системы отбора проб и проведения тестов получены максимально точные и стабильные данные
 - Высокие требования по контролю обеспечивают высокую стабильность качества производимого продукта
 - К сожалению результаты тестов не предсказывают проводимость (тесты на проводимость в КАРБО проводятся 24/7/365)
- При выборе пропанта
 - Каждый решает сам для себя, но необходимо быть осторожным.
 - Может использоваться для контроля за качеством.
 - Тесты на проводимость это наилучший способ оценки пропантов

От API-тестов к практике

- Мы понимаем, что тест API дает обманчивые или, в лучшем случае, неполные ответы
- Тесты на проводимость ближе к действительности и лучший инструмент для выбора пропанта
- Сейчас лаборатория действительно может определить величину проводимости и влияние качества пропанта на продуктивность

Пропант в нетрадиционных коллекторах

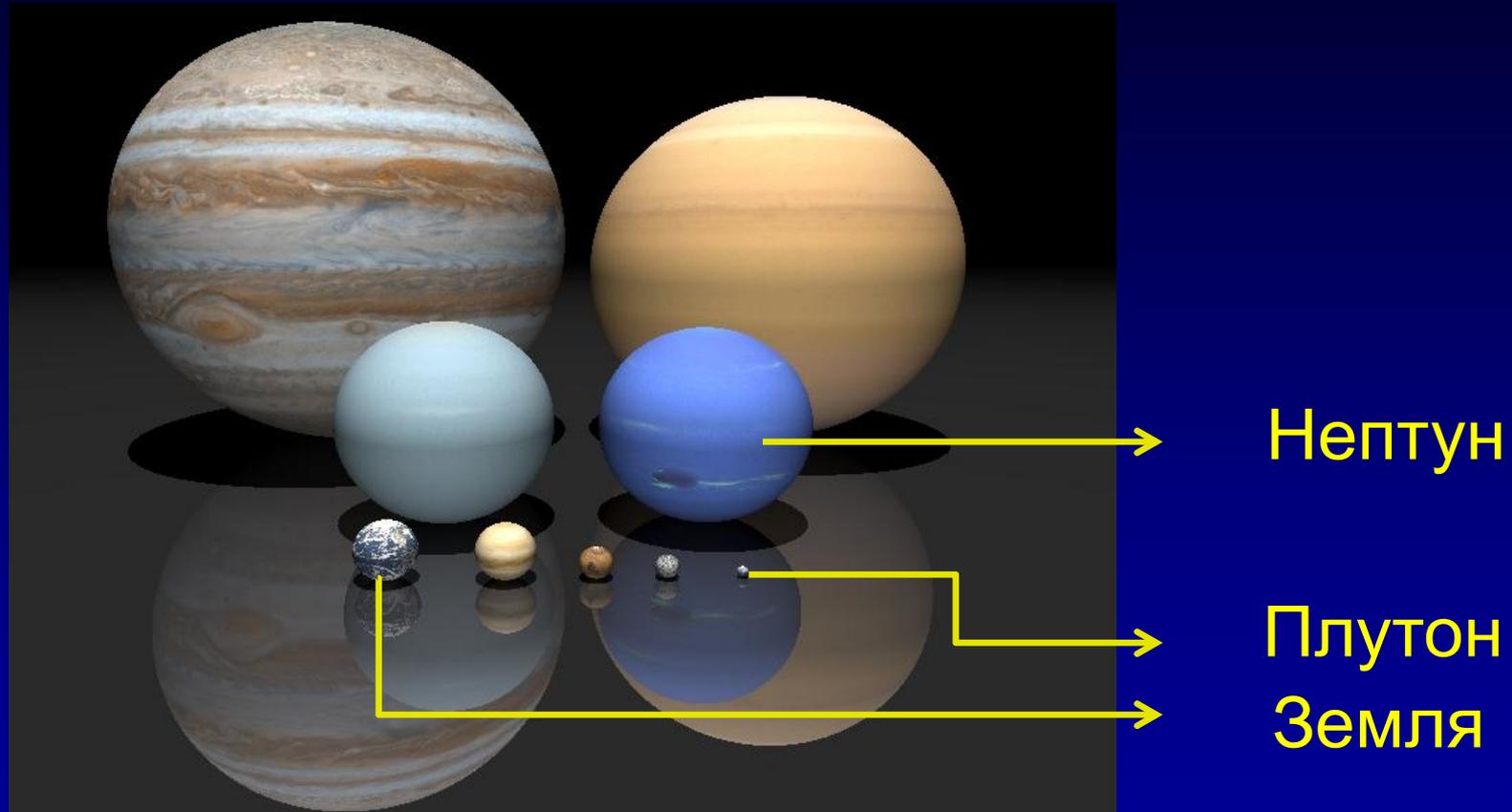
Проблема трудных / нетрадиционных коллекторов:

- ЭКСТРЕМАЛЬНО низкая проницаемость пласта

Применение ключевых технологий, стимулирующих разработку нетрадиционных коллекторов:

- Бурение и заканчивание горизонтальных скважин
- Многостадийные ГРП для увеличения контакта с породой

Визуализация проницаемости (поровые каналы)



Территория Москвы выглядит
пылинкой!

Оптимизация ГРП

- Размещение ствола скважины и длина горизонтальной секции
- Оборудование заканчивания скважин и технология изоляции
- Интервал стадий ГРП и их количество
- Геометрия и **проводимость** трещин

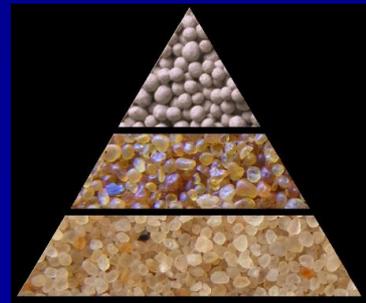
Как мы можем увеличить проводимость трещины?

- Увеличение объема пропанта
- Увеличение концентрации пропанта
- Увеличение размерности пропанта (зависит от качества)
- Снижение загрузки полимера
- Более высококачественный пропант

В большинстве случаев увеличение проводимости приводит к увеличению стоимости обработки

Процесс выбора пропанта

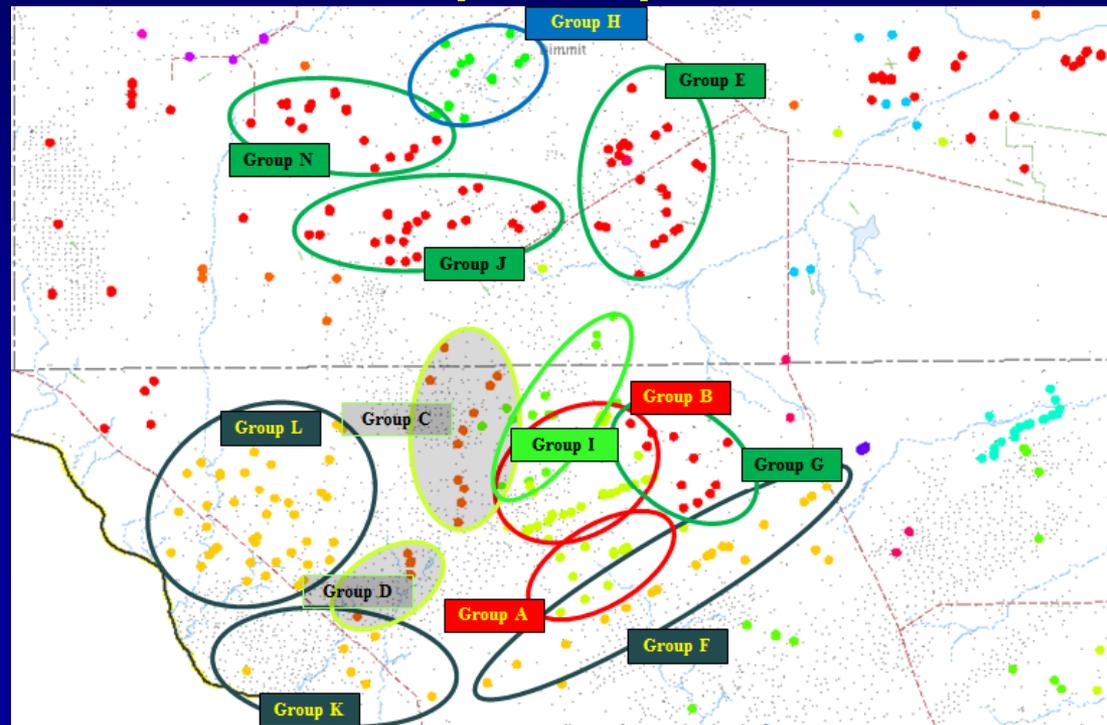
- Оценка проводимости трещины при реальных условиях
 - *Несколько сложных моделей трещины позволят это сделать*
- Тест на чувствительность для определения оптимальной проводимости
 - *Обеспечивает более быстрый возврат инвестиций*
- Подтверждение полевыми результатами
 - *Результаты соответствуют модели? Калибровка?*



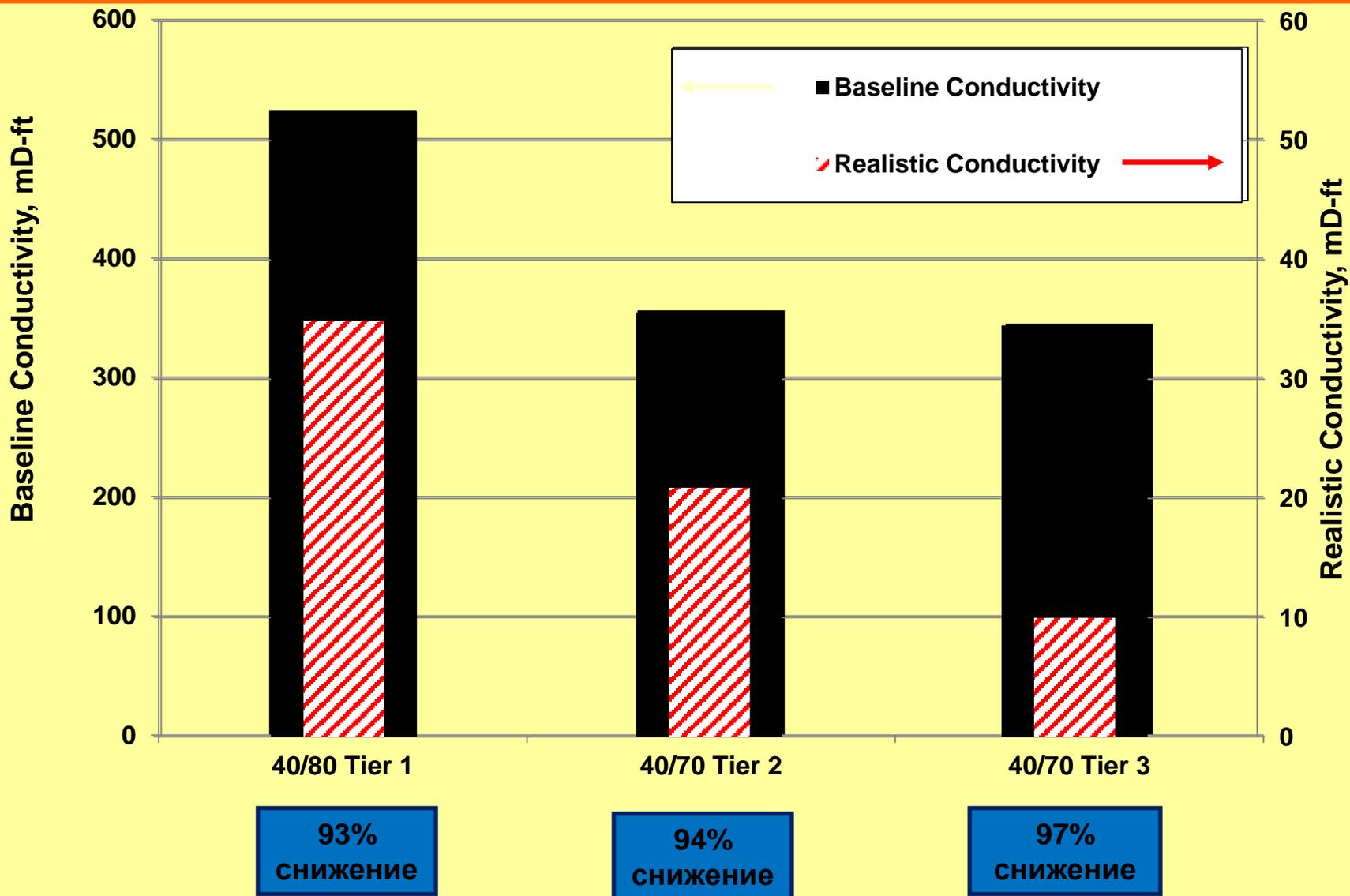
Месторождение Eagle Ford

Оператор округа Webb

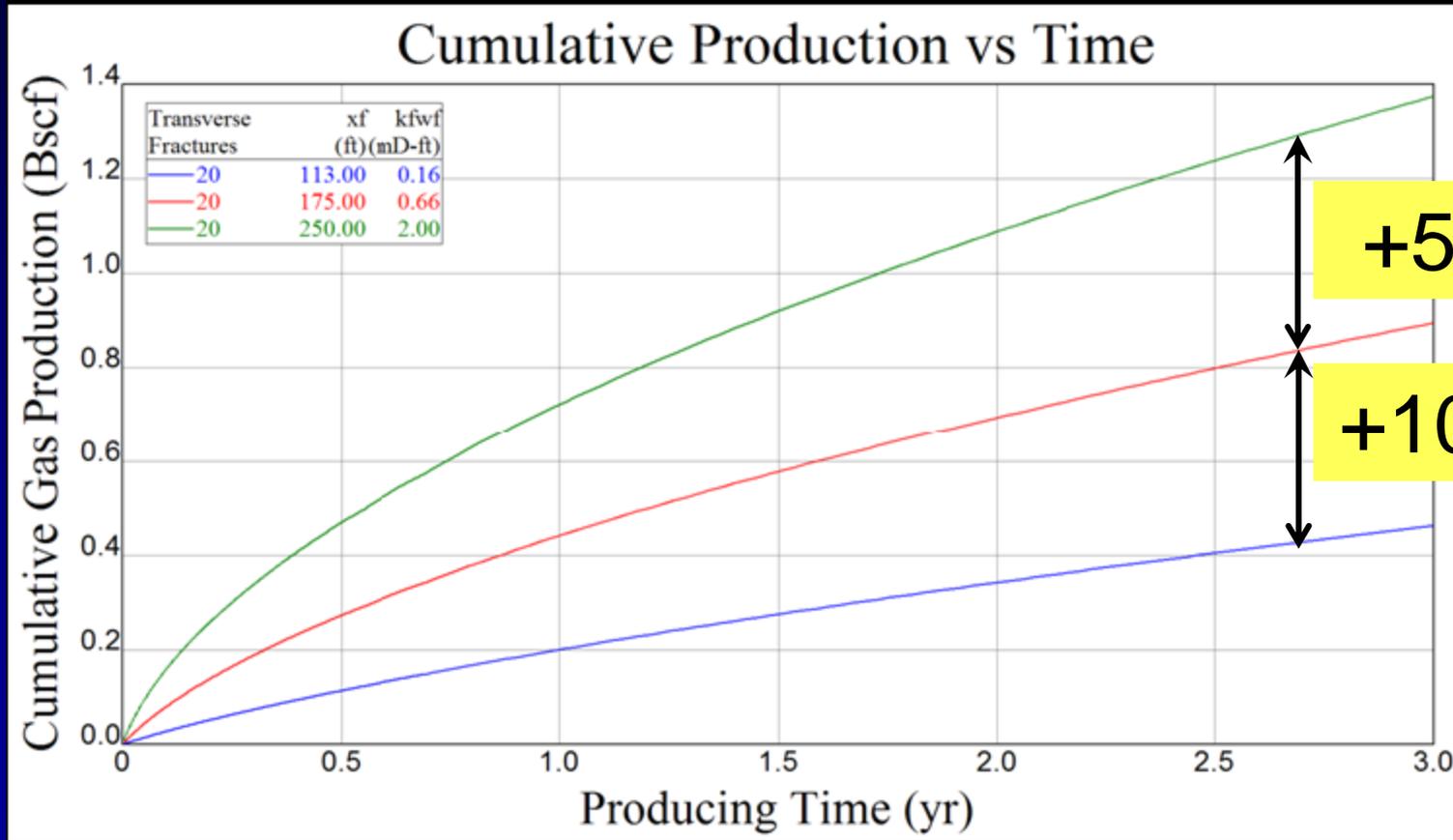
- Сравнение пропантов Tier 1 и Tier 3
- Сравнение собственных скважин со скважинами соседних операторов



Проводимость в условиях Eagle Ford

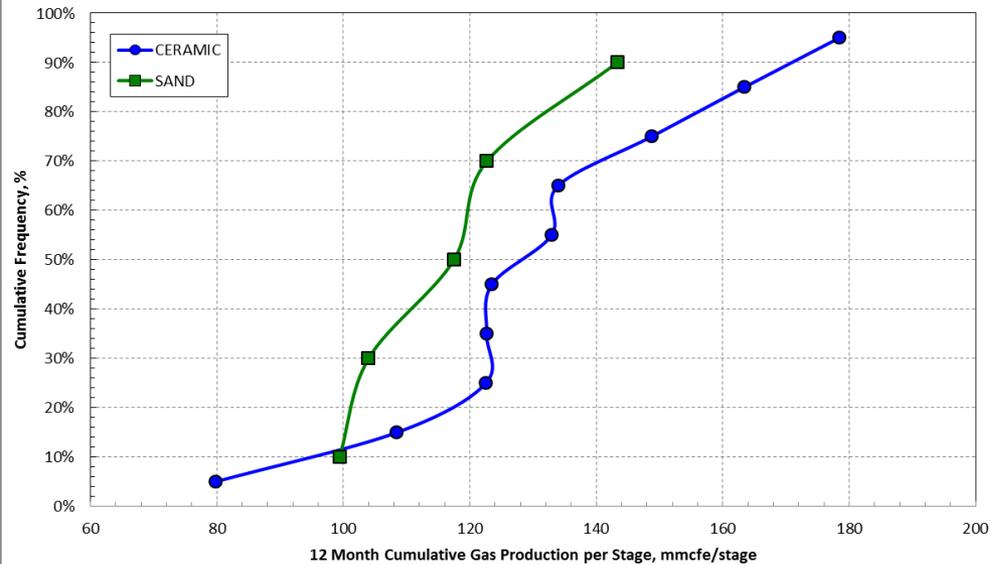


Расчет продуктивности. Eagle Ford.

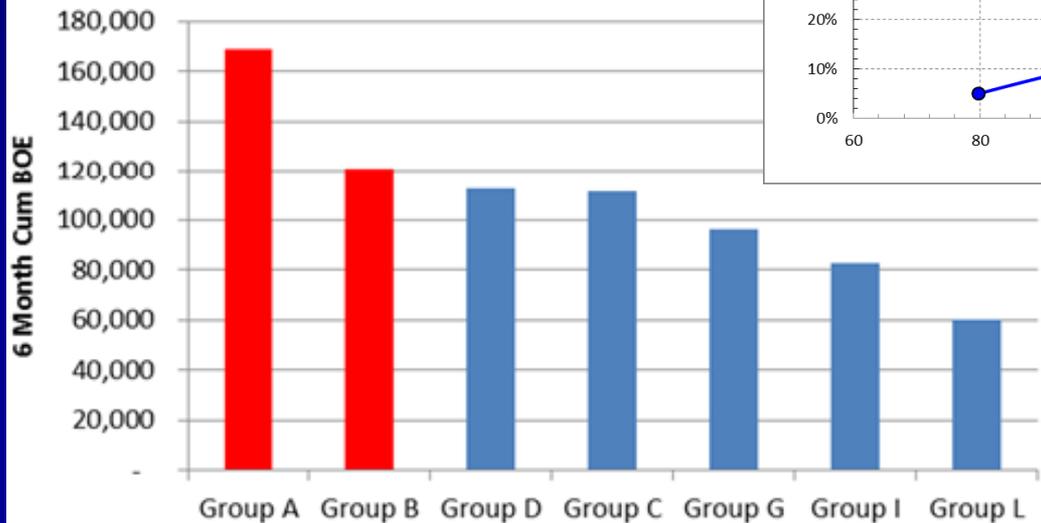


Влияние проводимости на продуктивность скважин

Rosetta Resources Gates Ranch
12 Month Cumulative Gas Production, MMCFE
Well Completion Between Sand and Ceramic Proppant
Normalized to Number of Stages



Ordered By 6 Month BOE - 6 Month Cumulative BOE

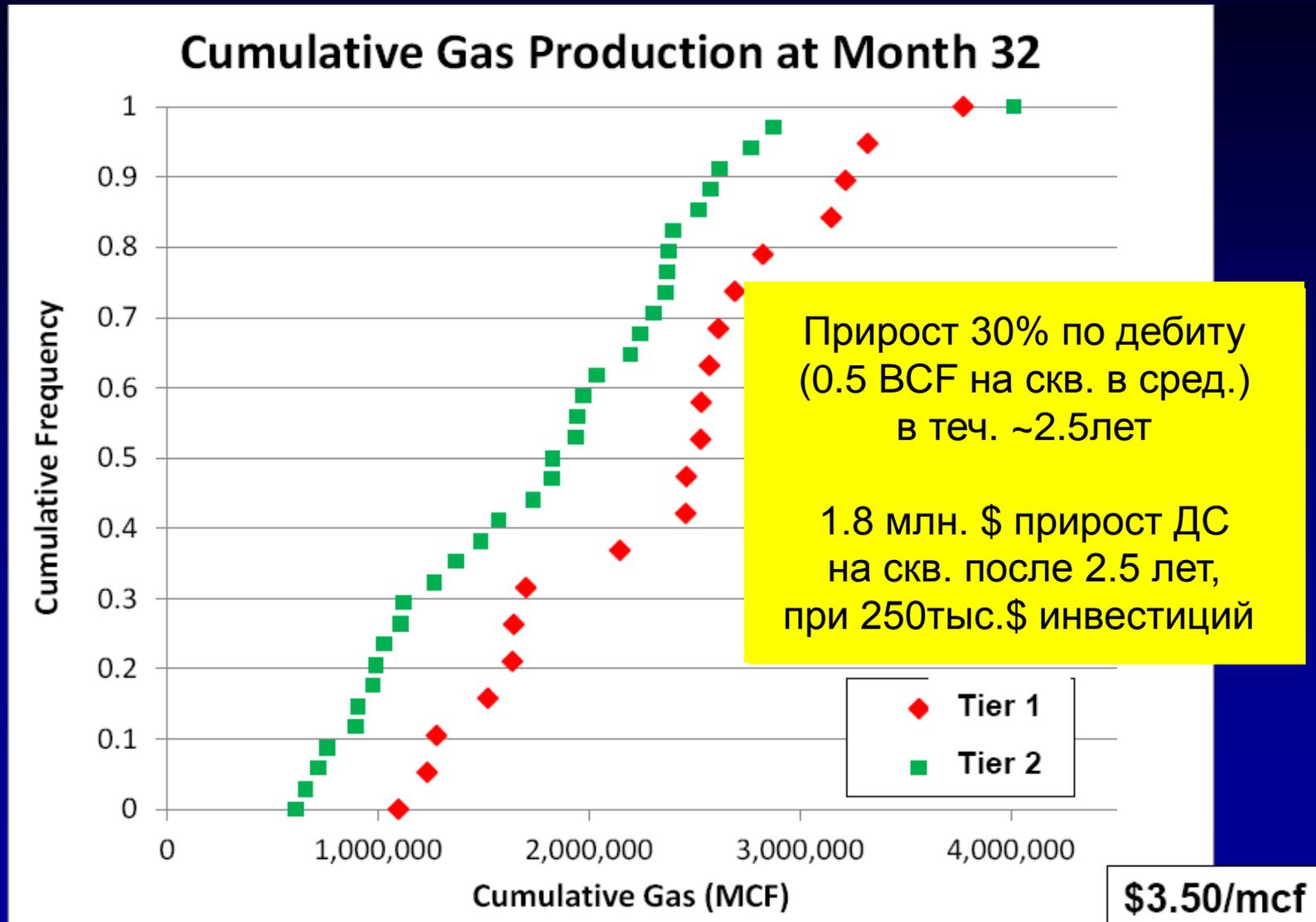


Месторождение сланцев Haynesville

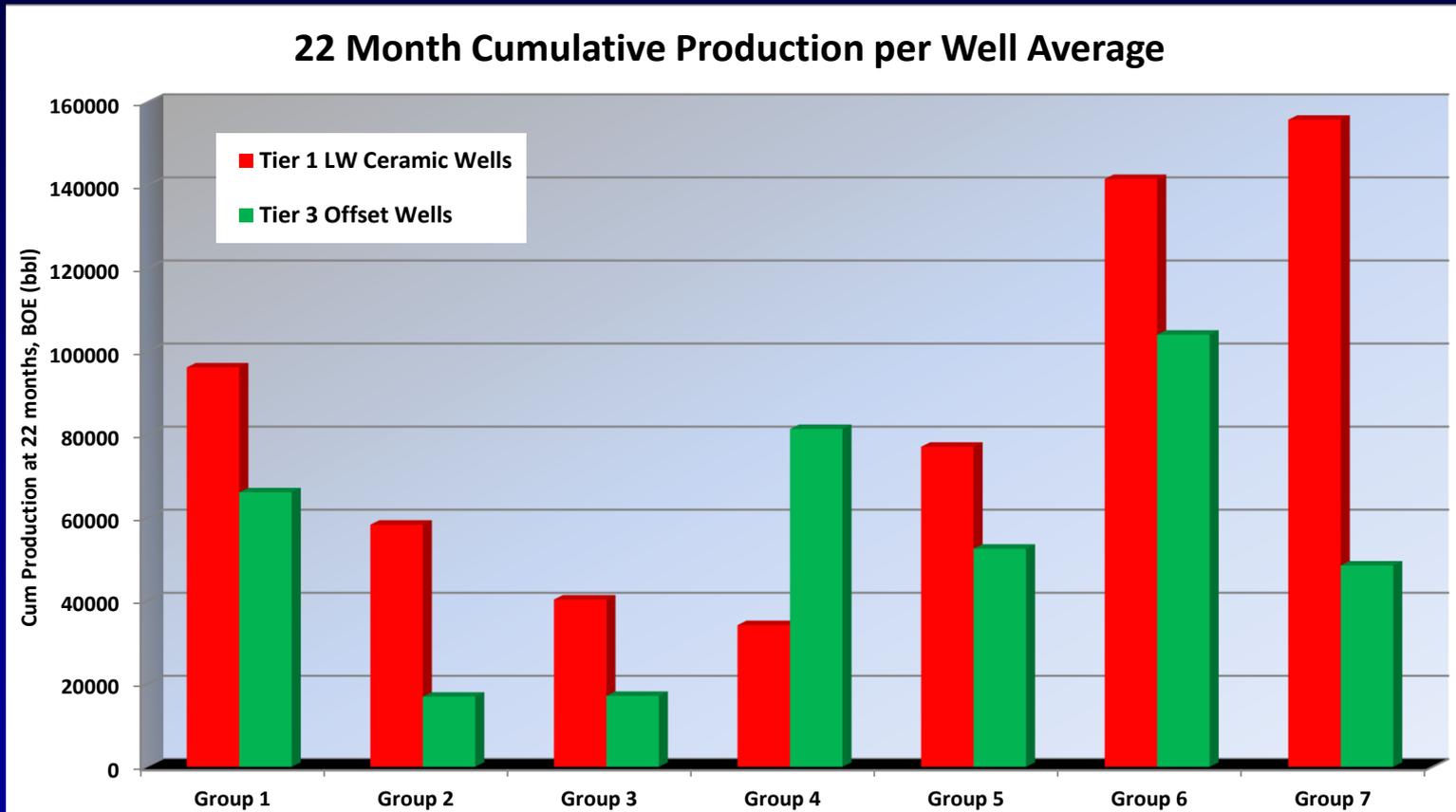
Сланцы Haynesville

- *Округ Desoto/Caddo. Один оператор*
- *55 скважин – 20 с использованием пропанта Tier 1, 35 с использованием пропанта Tier 2*
- *Все скважины пробурены/закончены в одинаковых условиях в один временной интервал*

Фактическая продуктивность через 2,5 года



ОПР на месторождении Ваक्кен



Свойства пропанта, влияющие на проводимость пропантной пачки

- Улучшенная округлость равносильна улучшенному “пространству для потока жидкости”
- Форма обломочных частиц пропанта
- Способность обломков к миграции
- Однородность и прочность пропанта
- Сопротивление циклическим нагрузкам, воздействию температуры и хим.реагентов

Основные моменты

- Процесс ГРП обеспечивает два ключевых момента – контакт высокопроводимого канала и продуктивного пласта.
 - *Это критично только для связи между пластом и скважиной*
- Пропант обеспечивает создание высокопроводимого канала.
- Гидроразрыв пласта - это повышенная проводимость в ограниченный период времени.
 - *Чем больше у Вас есть, тем больше Вы делаете*
 - *Нужно оценивать проводимость трещины в реальных условиях*
- Выбор пропанта не может быть сделан на основании данных о глубине, напряжении, диаметре частиц или действий последнего инженера
 - *Необходимо моделировать под конкретные условия скважины*
- Выбор пропанта – это соотношение цены и экономической эффективности
 - *Вы должны определить экономический эффект увеличения проводимости при помощи моделирования ГРП и подтверждения полевыми данными*

Выводы

- На выбор пропанта влияет его доступность и стоимость
- Разработка нетрадиционных коллекторов требует больших объемов
- Выбор жидкости и целевой проводимости должны определять выбор пропанта
- Лучшие результаты заканчивания скважин требует реалистичной оценки проводимости
- Экономический эффект может быть значительным

Вопросы?

- Презентация основана на статье SPE 119242 и 160206
- Соавторы: T. Palish, M. Chapman, J. Godwin, R. Dunckel S. Woolfolk, M.C Vincent