

# Сравнительный анализ методик геомеханического моделирования гидравлического разрыва пласта

**П.И. Елисеев**

начальник отдела интенсификации пласта и технологии добычи<sup>1</sup>

[eliseev@novatek.ru](mailto:eliseev@novatek.ru)

**А.Н. Шорохов**

консультант

[shorokhov.an@mail.ru](mailto:shorokhov.an@mail.ru)

**А.В. Язьков**

заместитель генерального директора по разработке<sup>2</sup>

[AVYazkov@novatek.ru](mailto:AVYazkov@novatek.ru)

**П.М. Команько**

заместитель генерального директора — главный геолог<sup>2</sup>

[pavel.komancko@tsng.novatek.ru](mailto:pavel.komancko@tsng.novatek.ru)

<sup>1</sup>ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

<sup>2</sup>ООО «НОВАТЭК-Таркосаленфтегаз», Тарко-Сале, Россия

**Качественное проектирование гидравлического разрыва пласта (ГРП) с каждым годом приобретает всё большую актуальность. Особенно это важно для пластов с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов, а также продуктивных объектов, стимуляция которых осложнена наличием близлежащих водонасыщенных пластов или контактов (ГНК, ВНК), т.к. прорыв трещины ГРП в нецелевые объекты может привести к повышенному значению обводненности добываемой продукции вплоть до полной нерентабельности эксплуатации подобной скважины. Кроме того, точное определение параметров геометрии трещины может показать, что на некоторых объектах вообще нецелесообразно проводить ГРП. Эффективность ГРП напрямую зависит от качества одномерного геомеханического моделирования разреза продуктивного пласта и геометрии трещины что в конечном счете оказывает существенное влияние на инвестиционные решения и стратегии разработки месторождений.**

На сегодняшний день существуют трехмерные симуляторы ГРП, которые позволяют моделировать трещину ГРП в условиях полноценной 3D геомеханической модели пласта. К сожалению, такой вариант моделирования мало доступен недропользователям и сервисным компаниям по ГРП, поскольку требует наличия не только достоверной геологической модели в профильных симуляторах (Petrel и т.п.), но и является более дорогим и трудоемким способом построения трехмерной геомеханической модели. Таким образом, на территории Российской Федерации в настоящее время моделирование ГРП преимущественно базируется на построении 1D геомеханической модели пласта в соответствующих симуляторах (Mfrac, FracPro и т.п.). Достоверность и полнота используемой информации при проектировании одномерной геомеханической модели пласта оказывает существенное влияние на инвестиционные решения и стратегию разработки месторождений с помощью ГРП в целом [1, 2].

Основываясь более чем на 20-летнем опыте проведения ГРП на территории Российской Федерации, можно выделить несколько способов построения одномерной геомеханической модели:

1. Классический подход (принцип аналогии);
2. Метод, основанный на использовании широкополосного акустического каротажа и результатов испытаний ядра на механические свойства;
3. Комплексный метод (учитывающий п. 1–2).

Далее рассмотрим эффективность каждого способа на конкретном примере.

Классический метод основан на региональном опыте проведения ГРП. Данный подход предусматривает использование информации о проведенных аналогичных операциях в регионе. Здесь деление вертикального разреза скважины в геомеханической модели на литологические пропластки (песчаник, аргиллит, алевролит и т.д.) осуществляется на основе интерпретации стандартного комплекса геофизических исследований в открытом стволе после бурения скважины (ГИС). Каждому пропластку

присваивается региональный (по аналогу) градиент давления закрытия в зависимости от литологического типа (к примеру песчаник — 0.13 атм/м, аргиллит — 0.15 атм/м), из которого в разрезе глубин вычисляется профиль минимальных горизонтальных напряжений. Значение модуля Юнга берется единое усредненное для всей одномерной геомеханической модели согласно данных исследований ядра в регионе. Поскольку минимальные напряжения рассчитываются напрямую из градиентов, т.е. реализации расчета по формуле Итона не требуются — значения коэффициента Пуассона существенного влияния на модель не оказывают и задаются на основе общих региональных значений по литотипам. Пример такого расчета приведен на рис. 1. Достоинством метода является относительная простота реализации. Однако точность подхода сильно зависит от наработанных параметров по миниГРП (давление закрытия, давление остановки и т.п.), т.е. от наличия большой статистики уже по проведенным работам на конкретном месторождении.

Следующий метод основан на детальном расчете минимальных напряжений по данным широкополосного акустического каротажа. Из динамических коэффициентов Пуассона, полученных по результатам записи поперечных и продольных скоростей пробега в породе, производится расчет минимальных напряжений по формуле Итона (формула 1) [3]:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_{ОВ} - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (1)$$

где:

$\sigma_h$  — напряжение в породе, атм;

$\nu$  — коэффициент Пуассона, д.ед.;

$P_p$  — пластовое давление, атм;

$\alpha$  — постоянная Биотта, по умолчанию равна 1;

$\sigma_{ОВ}$  — горное давление, атм.

Динамические значения модуля Юнга, полученные по данным каротажа, пересчитываются в статические на основе ядерной зависимости (рис. 2). Подобные зависимости основаны на результатах исследования ядра акустическими методами и трехосным

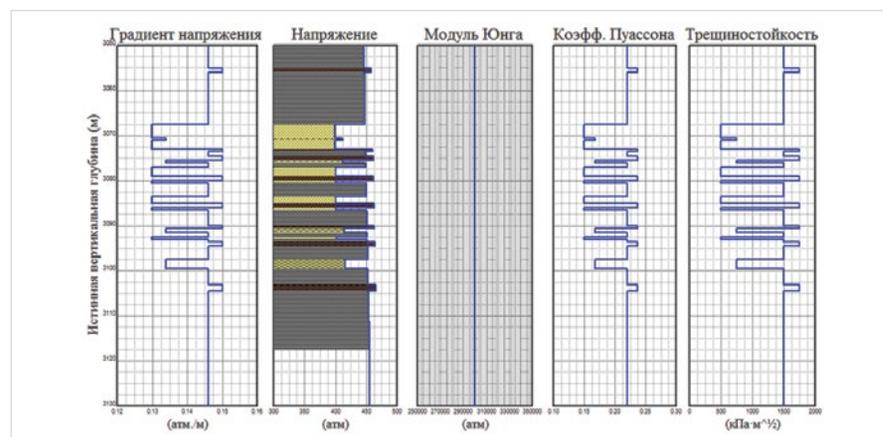


Рис. 1 — Одномерная геомеханическая модель ГРП на основе стандартного подхода

## Материалы и методы

Одномерное геомеханическое моделирование пласта, симулятор ГРП MFrac, геологическое моделирование пласта Petrel, специализированные исследования ядра.

## Ключевые слова

одномерная геомеханическая модель, гидравлический разрыв пласта, механические свойства породы

сжатием в лабораторных условиях на специальном стенде, в результате чего могут быть получены и скоррелированы друг с другом статические и динамические значения механических свойств породы. Таким образом, расчетный профиль минимальных напряжений и статические значения модуля Юнга закладываются в модель (рис. 3).

При реализации данного подхода модель получается с высоким уровнем детализации и логично утверждать, что увеличивается уровень точности выходного результата, несмотря на то, что проведение дополнительных

исследований увеличивают время и затраты на их проведение. Достоверность подобного подхода также зависит от оборудования, качества проведения и интерпретации данных широкополосного акустического каротажа и лабораторного тестирования ядра.

Следующий метод представляет собой некий симбиоз вышеописанных. Одномерная геомеханическая модель формируется на основе литологических пропластков по данным интерпретации ГИС. Затем каждому пропластку присваиваются соответствующие механические свойства из данных исследований ядра на статические свойства. В случае наличия исследований только на динамические значения, модуль Юнга возможно перевести в статический параметр через среднестатистические зависимости такие как:

1. Корреляция Моралеса:

$$E_{ст} = (-2,21 \times \varphi + 0,963) \times E_{дин} \quad (2)$$

где:

$E_{ст}$  — статический модуль Юнга, ГПа;

$\varphi$  — пористость, д.е.д;

$E_{дин}$  — динамический модуль Юнга, ГПа.

2. Корреляция Брайна:

$$E_{ст} = -4,24 + 0,835 \times E_{дин} \quad (3)$$

где:

$E_{ст}$  — статический модуль Юнга, ГПа;

$E_{дин}$  — динамический модуль Юнга, ГПа.

Данными зависимостями список не ограничивается, но оба способа являются наиболее популярными и проверенными для целого ряда месторождений [1, 3, 4]. Подобные корреляции также полезны, когда отсутствует керновая зависимость, но имеются данные записи широкополосного акустического каротажа. Пример расчета такой геомеханической модели приведен на рис. 4.

Данный способ является достаточно универсальным, т.к. позволяет использовать данные широкополосного каротажа или исследований ядра, в зависимости от того, что на момент проектирования ГРП имеется в наличии. Кроме того, метод учитывает литологическое разделение, определенное по данным полного комплекса ГИС, а не только одного акустического каротажа.

Если заложить полученные геомеханические модели в симулятор ГРП и провести моделирование с одинаковым графиком закачки и свойствами жидкости, то получатся отличные друг от друга параметры геометрии трещины.

Для проверки и настройки одномерной геомеханической модели существует простой и довольно точный способ определения фактической закрепленной высоты трещины в околоскважинной зоне — это закачка специального меченого нерадиоактивного проппанта (например, CARBO NRT). Заключается данный метод в обработке частиц проппанта специальным слоем, который позволяет захватывать нейтроны. По результатам сопоставления записей импульсного нейтронного каротажа, выполненных до и после ГРП, возможно определить место расположения меченого проппанта или закрепленной трещины. Используя полученное значение фактической высоты трещины можно оценить достоверность построения одномерной геомеханической модели, путем решения обратной задачи. ООО «НОВАТЭК НТЦ» были выполнены исследования в этой области на фактических скважинах, где производилась закачка меченого проппанта.

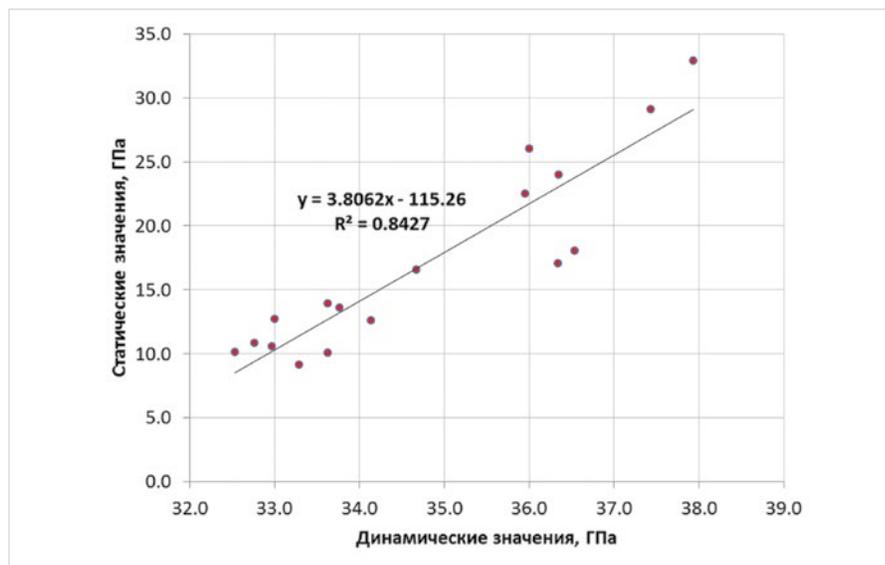


Рис. 2 — Пример зависимости перевода динамических значений модуля Юнга в статические

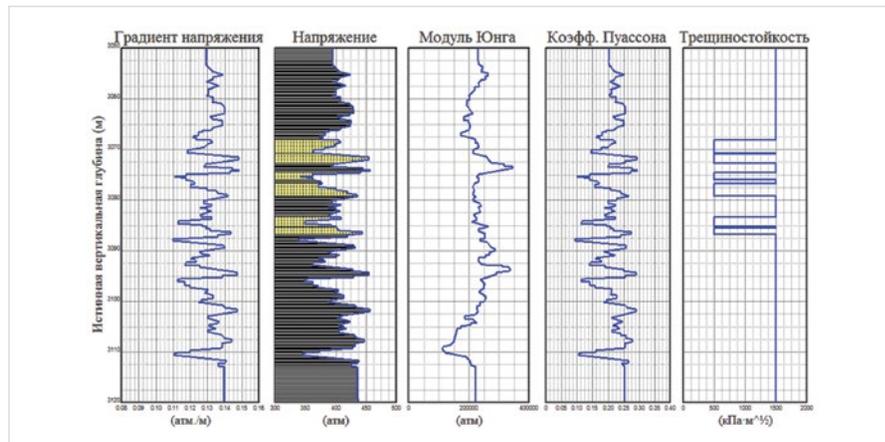


Рис. 3 — Одномерная геомеханическая модель ГРП на основе акустического каротажа и керновой зависимости

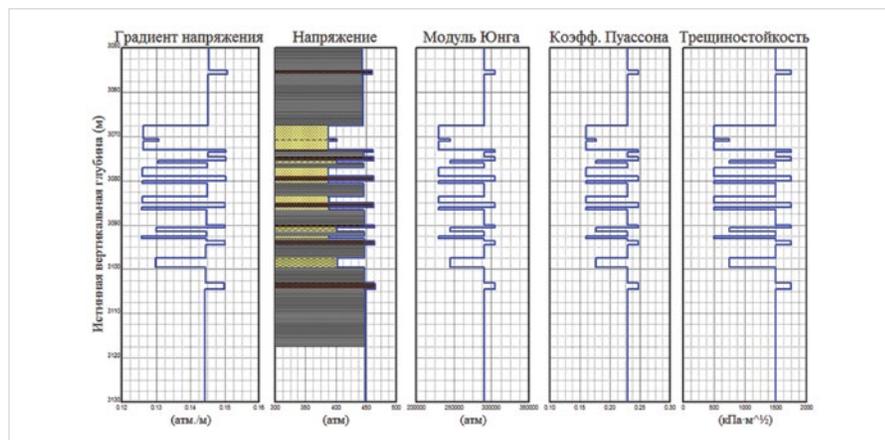


Рис. 4 — Одномерная геомеханическая модель ГРП на основе комплексного подхода

В таб. 1 приведены результаты моделирования ГРП, выполненные по одной и той же скважине по вышеперечисленным методам. Очевидно, что комплексный подход к одномерному моделированию дает наиболее достоверные результаты по высоте трещины и её позиционированию по глубине (расположение границ) — погрешность менее 5%. Классический метод показывает самую высокую погрешность относительно высоты трещины ~15% за счет усреднения модуля Юнга и линейной зависимости градиентов

разрыва относительно литологии. Подход привязки к акустическому каротажу показывает удовлетворительные результаты относительно высоты трещины, однако, дает существенную погрешность в позиционировании трещины, что указывает на низкое качество проведенных исследований на данной скважине. Визуальное сравнение геометрий трещин представлено на рис. 5, оценка относительных погрешностей по каждому методу относительно данных по фактическому расположению трещины приведена в таб. 2.

Комплексный подход успешно реализован при проектировании многостадийного ГРП в горизонтальных скважинах на многих месторождениях, разрабатываемых в Группе компаний ОАО «НОВАТЭК». На рис. 6 показан один из типичных примеров применения данного подхода к проектированию многостадийного ГРП с минимизацией риска прорыва трещины ГРП за контакты (ГНК и ВНК). Построение 1D геомеханической модели проводилось в условиях сильно расчлененного коллектора с высокой проницаемостью и наличием дизъюнктивных зон разуплотнения коллектора, горсто-грабённых структур с различными амплитудами и углами падения (по сути — проводимых для жидкости ГРП разломов). При таких исходных данных геологическое строение имеет высокую степень изменчивости уже в пределах расстояний между муфтами ГРП в рамках одной скважины, в следствие чего требования к точности проектирования ГРП для каждой стадии достаточно высокие. Для реализации комплексного подхода были выполнены исследовательские работы по определению геометрии трещины (микросейсмический мониторинг многостадийного ГРП в горизонтальной скважине, определение закрепленной высоты трещины меченным пропантом CARBO NRT в наклонно-направленной скважине, профилометрия притока и т.п.).

На основе результатов вышеуказанных прогрессивных исследований подобран и успешно реализован следующий алгоритм построения модели ГРП для горизонтальных скважин:

- Осуществляется корреляция нижней части разреза, нескрытой при бурении горизонтального ствола, с ближайшей наклонно-направленной скважиной, в т.ч. используется 3D геологическая модель.
- Выполняется корреляция верхней части разреза, перекрытой основной колонной диаметром 178 мм, с ближайшими наклонно-направленными скважинами;
- Учет угла падения структуры по данным геонавигации в процессе бурения, с указанием расстояния от муфты ГРП до кровли пласта;
- Формирование пропластков (песчаник, глина, плотный, уголь) в 1D геомеханической модели комплексным методом индивидуально для каждой стадии ГРП в рамках одной скважины, формируется итоговый «синтетический» las-файл литологии;
- Расчет градиентов напряжений по формуле Итона (1) [3];
- Выбор оптимального графика закачки и массы пропанта индивидуально для каждой стадии ГРП.
- Калибровка напряжений осуществляется по результатам расширенного мини-ГРП (увеличенная буферная стадия). Выполняется детальный анализ количества точек закрытия трещин ГРП, проводится корреляция с разрезом, полученные данные сопоставляются и анализируются совместно с ранее выполненными ГРП по соседним скважинам. По результатам принимается окончательное решение о массе пропанта и графике закачки.

Данный подход позволил для каждой стадии индивидуально оптимизировать график закачки с минимизацией прорыва трещины за контакты (ГНК, ВНК). Эффективность принятых инженерных решений подтверждается результатами освоения скважины и

Параметр геометрии трещины	ед. изм.	Способ построения модели			Исследования меченным пропантом	
		Классический подход	Акустический каротаж	Комплексный подход		
Полудлина	общая	м	147.1	161.4	162.0	-
	эффективная*	м	133.5	144.4	150.1	-
Высота	средняя	м	57.5	55.0	49.2	-
	общая	м	70.0	65.8	59.2	60.5
Ширина	средняя	мм	2.89	3.25	3.02	-
	максимальная	мм	10.37	10.72	10.82	-
Проводимость	абсолютная	мД*м	411.2	441.6	431.4	-
	безразмерная**	д.ед.	3.08	3.06	2.87	-
Границы трещины (TVD)	верхняя	м	3039.5	3052.2	3045.8	3047.5
	нижняя	м	3109.5	3118.0	3105.0	3108.0

\*расчет эффективной полудлины выполнен от концентрации пропанта 4кг/м<sup>3</sup>

\*\*из расчета проницаемости пласта 1мД

Таб. 1 — Сравнение параметров геометрии трещин при применении различных подходов по геомеханическому моделированию

Погрешность	Способ построения модели			
	Классический подход	Акустический каротаж	Комплексный подход	
Погрешность определения высоты	16%	9%	2%	
Погрешность позиционирования	Нижняя граница	13%	8%	3%
	Верхняя граница	3%	17%	5%

Таб. 2 — Оценка относительных погрешностей по каждому методу геомеханического моделирования относительно данных по фактическому расположению трещины

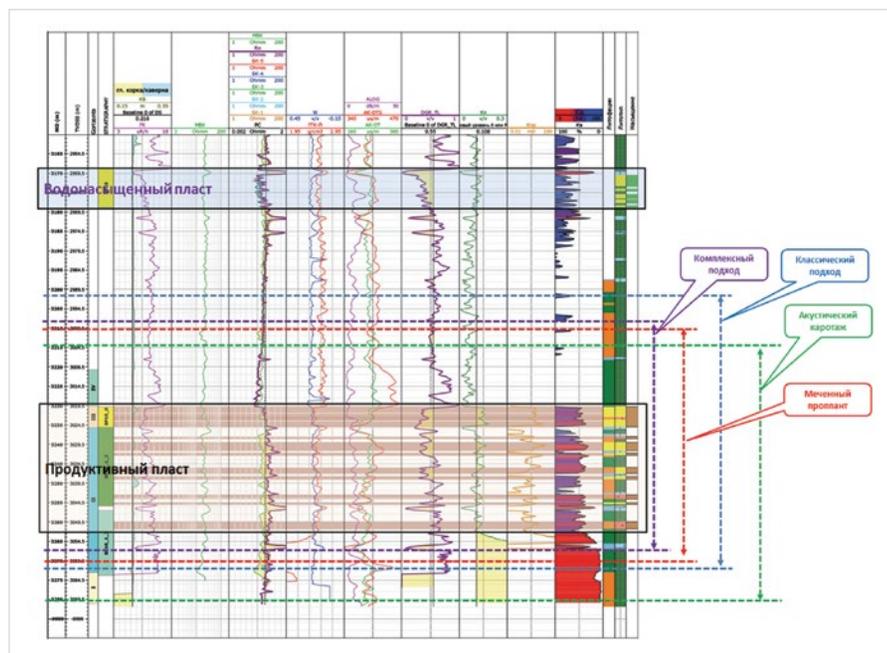


Рис. 5 — Сравнительный анализ размещения границ трещин при применении различных подходов

промыслово-геофизических исследований. На скважинах, где был реализован комплексный подход проектирования МГРП, наблюдается низкая обводненность добываемой продукции, что свидетельствует об отсутствии приобщения трещиной ГРП нижележащих водоносных пропластков.

### Итоги

В данной статье приведен сравнительный анализ различных подходов к одномерному геомеханическому моделированию ГРП, выполненный ООО «НОВАТЭК НТЦ»

### Выводы

Результаты сопоставления методов показывают важность точности определения высоты и позиционирования трещины по глубине в связи с наличием вышележащего водоносного пласта, прорыв в который при проведении ГРП недопустим. Калибровка одномерной геомеханической модели в подобных случаях позволяет подобрать оптимальный дизайн операции, оптимизировать массу и график закачки проппанта без риска прорыва в близлежащий водоносный горизонт. Точность построения модели ГРП

сводится к наличию полного набора исходных данных (комплекс ГИС, специализированные исследования ядра, широкополосный акустический каротаж), однако, при отсутствии одного из элементов возможно снижение погрешности за счет применения комплексного подхода.

### Список литературы

1. Летичевский А.Е. Опыт построения геомеханических моделей для повышения эффективности планирования ГТМ ОАО «Самаранефтегаз». Техническая конференция SPE «Эксплуатация горизонтальных скважин после многостадийного ГРП». Самара, 2014.
2. Колонских А.В. Учет геомеханических эффектов при проектировании систем разработки с горизонтальными скважинами с многостадийным гидравлическим разрывом пласта. Техническая конференция SPE «Эксплуатация горизонтальных скважин после многостадийного ГРП». Самара, 2014.
3. M. Zoback Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press, New York, 2007, p. 282
4. Michael Economides, Ronald Oligney, Peter Valkó Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice, Orsa Press, Alvin TX, 2002, p. 40

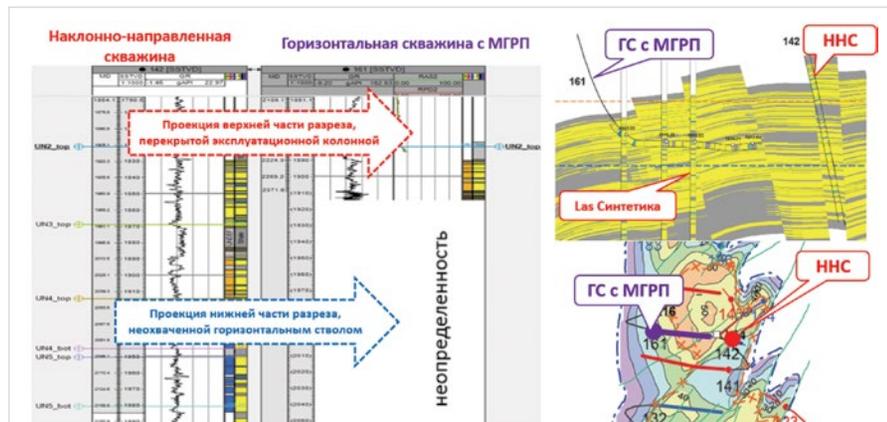


Рис. 6 — Пример практического применения комплексного подхода проектирования ГРП в ОАО «НОВАТЭК»

## Comparing analysis for different approaches of geomechanical modeling to design hydraulic fracturing

UDC 622.276

### Authors:

**Petr I. Eliseev** — head of section<sup>1</sup>; [eliseev@novatek.ru](mailto:eliseev@novatek.ru)

**Aleksei N. Shorokhov** — consultant; [shorokhov.an@mail.ru](mailto:shorokhov.an@mail.ru)

**Alexey V. Yazkov** — deputy general director<sup>1</sup>; [AVYazkov@novatek.ru](mailto:AVYazkov@novatek.ru)

**Pavel M. Komanko** — deputy general director - chief geologist<sup>2</sup>; [pavel.komanko@tsng.novatek.ru](mailto:pavel.komanko@tsng.novatek.ru)

<sup>1</sup>Limited Liability Company “NOVATEK Scientific and technical center”, Tyumen, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC “NOVATEK-Tarkosaleneftegaz”, Tarko-Sale, Russian Federation

### Abstract

Quality project of hydraulic fracturing has big actuality at current time. Especially it is important for hard-to-recover reserves and formations with nearby water saturated reservoir or gas-oil and water-oil contacts. Breakthrough of fracture to water saturated reservoirs increases water production and decline well profitability. Furthermore actual determination of geometry parameters can elucidate reasonability to use hydraulic fracturing for certain reservoirs. Hydraulic fracturing efficiency depends on adequacy of one-dimension geomechanical models and influences investing decisions and development strategy.

### Materials and methods

ne-dimensional geomechanical modeling, frac simulation - Mfrac, geological modeling – Petrel, specialized core study.

### Results

The article is about comparing analysis for different approaches of geomechanical modeling performed by LLC “NOVATEK STC”.

### Conclusions

Results of mapping methods show the importance of accuracy in determining the height and positioning of the fracture depth in connection with the presence of overlying water-saturated reservoir, a breakthrough of fracture in

that is not allowed. Calibration one-dimensional geomechanical model in such cases allows to choose the optimal design of the operation, and optimize the proppant pumping schedule without a risk to breakthrough in nearby aquifer. The accuracy of frac model patterns is reduced to having a full set of baseline data (well logging suite, specialized core study, full-wave acoustic logging). But, in the absence of one of the elements may reduce errors due to application of an integrated approach.

### Keywords

one-dimensional geomechanical model, hydraulic fracturing, mechanical rock properties

### References

1. Letichevskiy A.E. *Opyt postroeniya geomekhanicheskikh modeley dlya povysheniya effektivnosti planirovaniya GTM ОАО «Samaraneftegaz»* [Experience of constructing geomechanical models to improve the efficiency of geological and technical planning of "Samaraneftegaz"]. SPE Conference "Running Horizontal Wells

with MSS Completion", Samara, 2014.

2. Kolonskikh A.V. *Uchet geomekhanicheskikh effektivnosti pri proektirovaniy sistem razrabotki s gorizontальnymi skvazhinami s mnogostadiynym gidravlicheskim razryvom plasta* [Accounting geomechanical effects in the design of systems development with horizontal wells with multi-stage hydraulic fracturing]. SPE Conference "Running

Horizontal Wells with MSS Completion", Samara, 2014.

3. M. Zoback Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press, New York, 2007, p. 282.
4. Michael Economides, Ronald Oligney, Peter Valkó Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice, Orsa Press, Alvin TX, 2002, p. 40.