

**Горизонтальные скважины
с многоступенчатым гидроразрывом
пласта – дальнейшее развитие
технологий для плотных и сланцевых
коллекторов**

Р.Р. Ибатуллин¹
¹TAL Oil Ltd.

Адрес для связи: ravil.r.ibatullin@gmail.com

Ключевые слова: Северная Америка, плотный коллектор, сланцевая нефть, горизонтальные скважины (ГС), технологии гидроразрыва пласта (ГРП), окупаемость проектов разработки

Современные технологии горизонтального бурения в сочетании с многоступенчатым гидроразрывом пласта (МГРП) обеспечили бурный рост добычи нефти из плотных коллекторов и сланцевых отложений в Северной Америке.

В статье рассмотрены новые технологии МСГРП в горизонтальных скважинах (ГС), в том числе - эффективные для условий плотных коллекторов и сланцевых отложений с использованием равнопроходных муфт различного типа, а также применение растворимых отклонителей для жидкости ГРП. Представлен анализ параметров ГС и МГРП в Северной Америке: длины ГС и число ступеней ГРП, типы жидкостей ГРП и объемы проппанта, а также стоимости бурения ГС и проведения ГРП, динамика числа ГС в кустах скважин. Показана степень окупаемости проектов разработки по объектам месторождений Канады различного типа.

**Horizontal wells
with multi-stage hydraulic fracturing
formation - further development
technologies for dense and shale
collectors**

Ravil Ibatullin¹
¹TAL Oil Limited, Calgary, Canada

E-mail: ravil.r.ibatullin@gmail.com

Keywords: North America, tight oil, shale oil, horizontal wells, multi-stage fracturing technology, development projects payback

Modern horizontal drilling technologies combined with multi-stage hydraulic fracturing have provided a rapid increase in oil production from tight and shale deposits in North America. The article discusses new technologies of multi-stage hydraulic fracturing in horizontal wells (HW). Among them, hydraulic fracturing technologies with the use of various types of equal-passage ports, as well as the use of soluble diverters for hydraulic fracturing fluid, are distinguished as effective for conditions of tight and shale oil deposits. The analysis of HW and multi-stage hydraulic fracturing parameters in North America has presented: HW lengths and the number of hydraulic fracturing stages, types of hydraulic fracturing fluids and proppant volumes, as well as the cost of drilling HW and completion, the dynamics of the number of HW in well pads. The payback values of various development projects for different oil plays and fields in Canada are also shown.

Современные технологии горизонтального бурения в сочетании с многоступенчатым гидроразрывом пласта (МГРП) привели к бурному росту добычи нефти из плотных и сланцевых отложений в мире. На этой основе ведется эффективная промышленная разработка громадных ресурсов нетрадиционных запасов в плотных и сланцевых отложениях.

Наиболее успешно указанные технологии применяются на территории Северной Америки (рис.1), где залежи углеводородов в плотных и сланцевых отложениях простираются на значительных площадях [1].

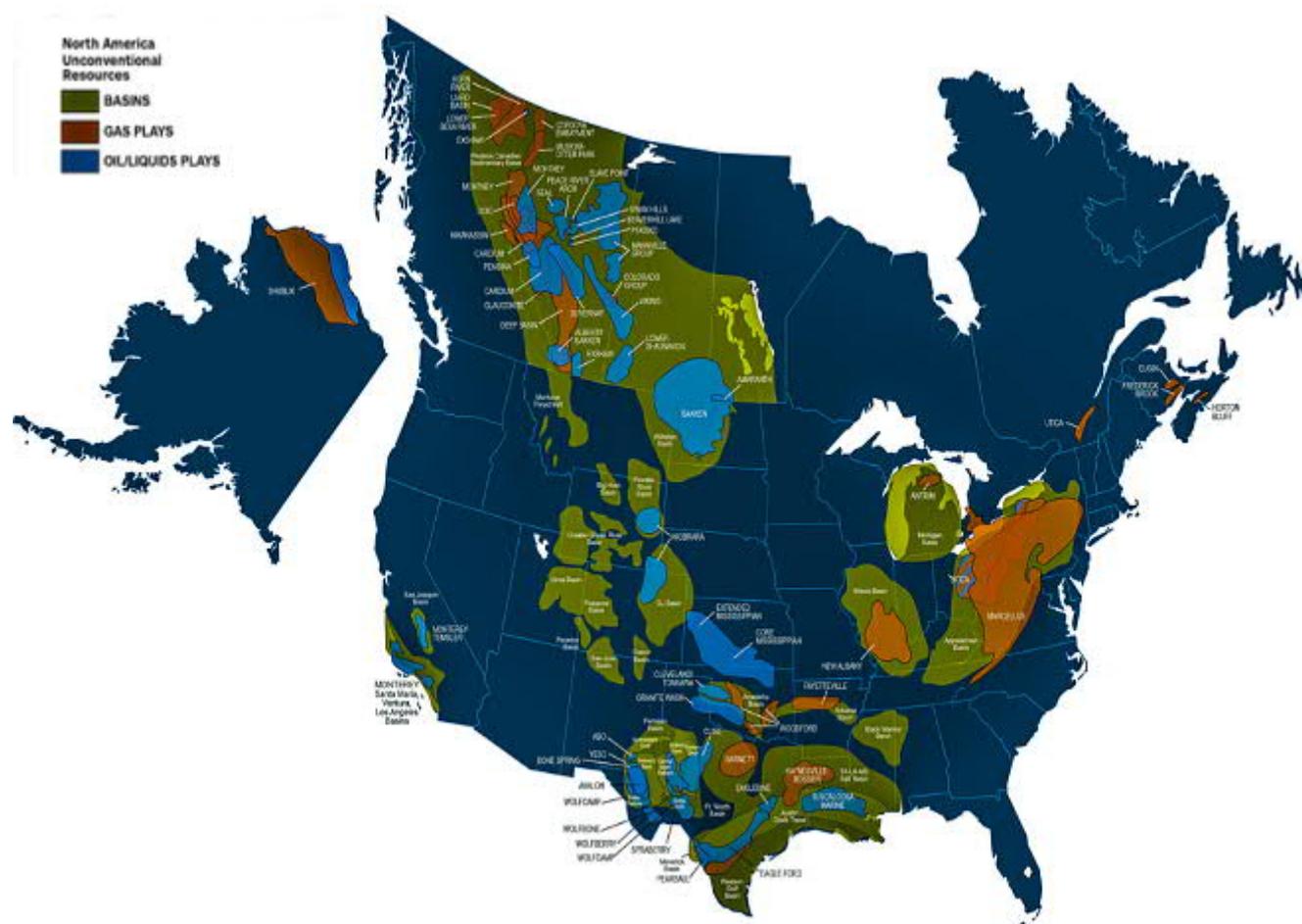


Рис. 1. Расположение запасов углеводородов в плотных и сланцевых отложениях в Северной Америке (<http://acre.bid/sell-mineral-rights>).

Зеленым цветом обозначены – бассейны, коричневым – преимущественно газовые углеводороды, голубым - преимущественно нефтяные углеводороды

Самыми активно разрабатываемыми среди них являются объекты пермского бассейна (Permian Basin) расположенные на юге США на глубинах до 3000 м. На территории Канады подобные запасы и ресурсы сосредоточены в разрезе Западно - Канадского осадочного бассейна (Western Canadian Sedimentary Basin). Краткая характеристика указанных объектов представлена в табл. 1.

Таблица 1

| Формация (провинция Канады, штат США) | Порода/возраст | Глубина, м |
|--|--|------------|
| Cardium (Alberta) | Песчаник/поздний меловой | 1100-1300 |
| Viking (Alberta, Saskatchewan) | Песчаник/ранний меловой | 600-900 |
| Bakken/Exshaw (Saskatchewan, Manitoba) | Песчаник/девон | 900-2500 |
| Duvernay/Muskwa (Alberta) Beaverhill Lake (Alberta) | Известняк/девон | 2000+ |
| Eagle Ford (Texas) | Известняк/верхнемеловой | 1500-4500 |
| Permian Basin (Texas, New Mexico) | Песчаник, алевролит, незначительно известняк/пермский | <3000 |

На рис. 2, 3 представлена динамика добычи нефти в 2012-2021г.г. по основным продуктивным отложениям месторождений легкой нефти в плотных и сланцевых коллекторах Западно - Канадского осадочного бассейна и США.

PRODUCTION BY PLAY

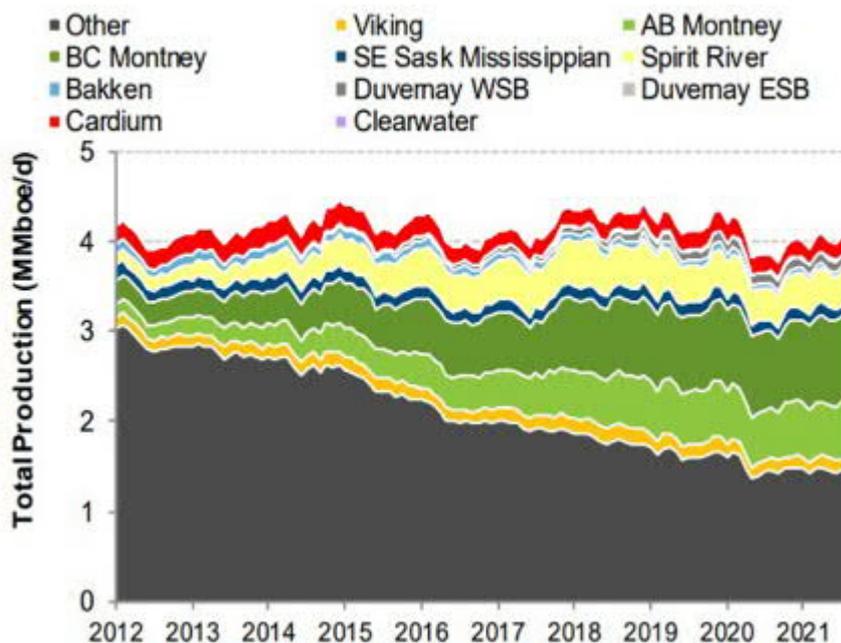


Рис. 2. Динамика добычи нефти, в том числе из плотных коллекторов и отложений сланцев, Западно-Канадского осадочного бассейна (BMO Capital Market)

Из рис. 2, 3 видно, что идет постепенное восстановление добычи нефти в Северной Америке после кризисного 2020 г. Следует отметить, что падение добычи по объектам плотных коллекторов и отложений сланцев в США было более значительным, чем в Канаде.

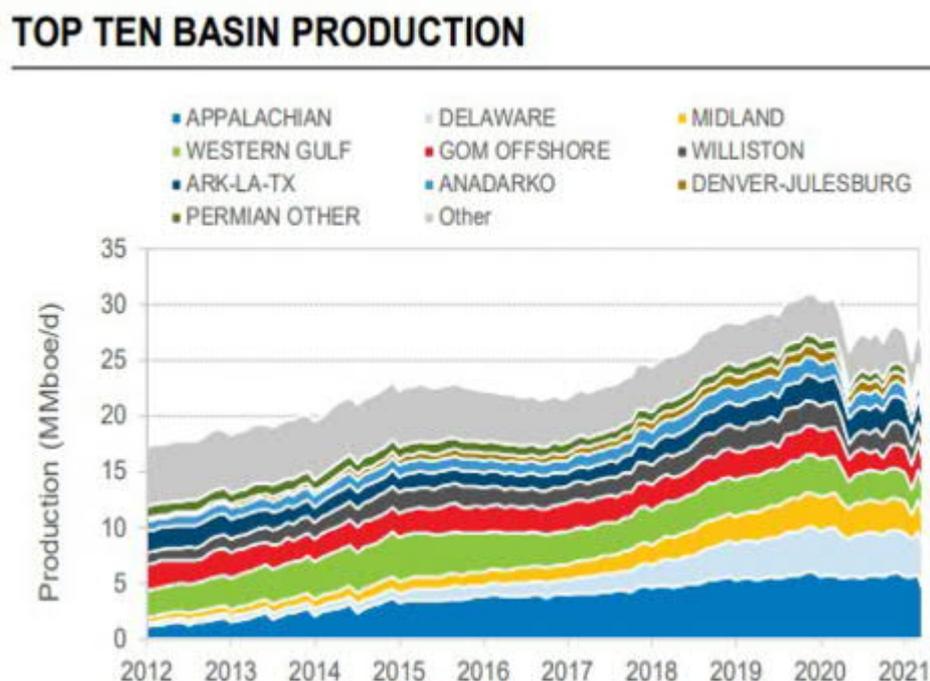


Рис. 3. Динамика добычи нефти, в том числе из плотных коллекторов и отложений сланцев, в США (BMO Capital Market)

Более резкое падение добычи нефти в кризисный 2020 г. в США объясняется большей долей добычи из плотных коллекторов и отложений сланцев. Разница в динамике разработки плотных коллекторов и сланцевых отложений при сопоставлении с обычными коллекторами объясняется значимым краткосрочным влиянием на резкий прирост добычи трещин ГРП, в последующем происходят резкое падение. Таким образом волатильность отклика на инвестиции в разработку таких месторождений гораздо большая, поэтому прогнозы добычи нефти в США существенно различаются у разных аналитических организаций (рис. 4). Однако, по всем прогнозам роста добычи нефти после 2035 г. уже не отмечается.

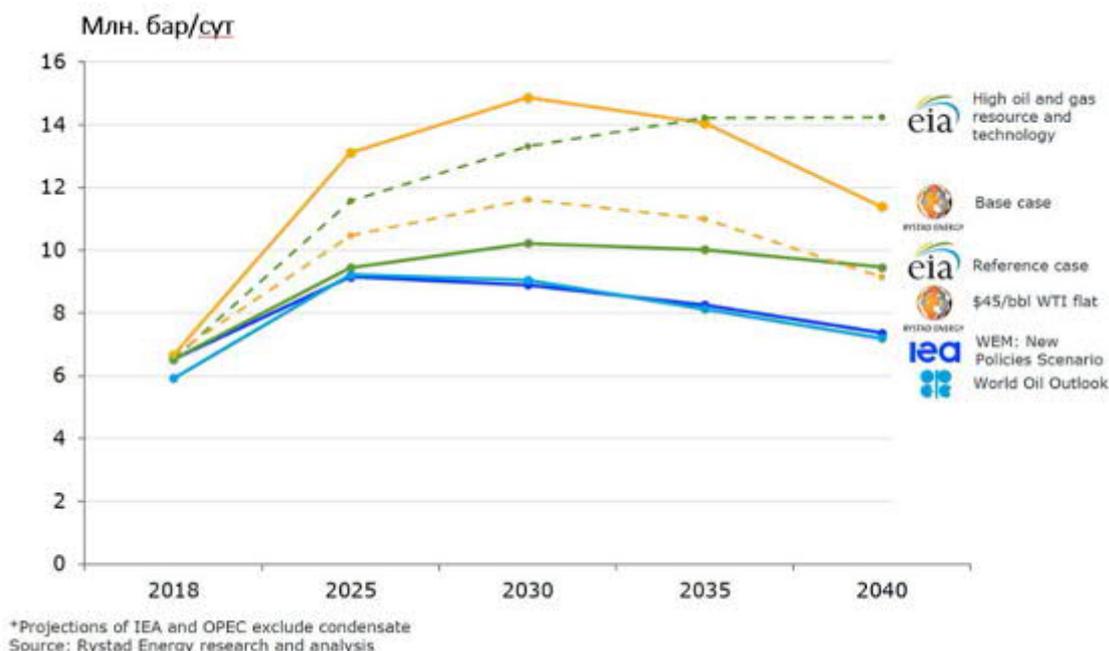


Рис. 4. Прогнозы добычи нефти в США до 2040 г.

В последние годы в условиях низких цен на углеводороды в Северной Америке удалось достигнуть резкого снижения стоимости услуг при повышении технологической эффективности применения МГРП. Важным резервом сокращения затрат является удешевление технических средств и уменьшение времени использования дорогостоящего и дефицитного «флота» ГРП и установок гибкой трубы.

Неустойчивость цен на нефть приводит к реализации более «агрессивных» технологий ГРП, заключающихся в большем числе разрывов по длине ствола, а также к большим объемам нагнетаемого проппанта и расходу жидкости разрыва при нагнетании. Кроме того, уплотняется сетка скважин.

Новое скважинное оборудование ГРП

Для снижения сопротивления потоку в протяженных стволах наряду с технологией последовательной перфорации и ГРП (plug and perf) применяются новые решения с равнопроходными открывающимися портами, такими как порты компании Stages, открываемые ключами (collets) со специальным профилем (рис.5). В отличие от стандартных шаровых клапанов в этом случае диаметр седел остается неизменным.



Рис. 5. Равнопроходные муфты Stages и ключи (collets) для шаров для их открытия

Аналогичное полнопроходное решение реализовано компанией Advanced Upstream (рис. 6) с применением электронно управляемых ключей - дартс (darts). При таких решениях может быть исключена техника на гибкой трубе не только для дорогостоящей операции по методу пакерование + перфорация (plug-and-perf), но и в процессе разбуривания шаров и седел. Для этого разработаны материалы, контролируемо растворяющиеся в кислотах, а также бескислотные системы, разрушающиеся в солевых растворах и условиях высоких температур. Примерами последних являются составы на основе магниевых сплавов, спрессованный компаунд из стекловолокна, цианатовый эфир смолы и сшиватель.



Рис. 6. Равнопроходные муфты с электронноуправляемым ключом (dart) компании Advanced Upstream

Технология отклоняющих агентов (divertors) заключается в закачке в естественные или индуцированные трещины временных блокаторов (безопасно разлагающихся) и перераспределении зон и направления трещин в новые области пласта (рис. 7). В итоге, значительно повышаются коэффициент охвата воздействием и дебиты скважины. Для этой цели применяются водорастворимые шариковые герметики BioBalls™.

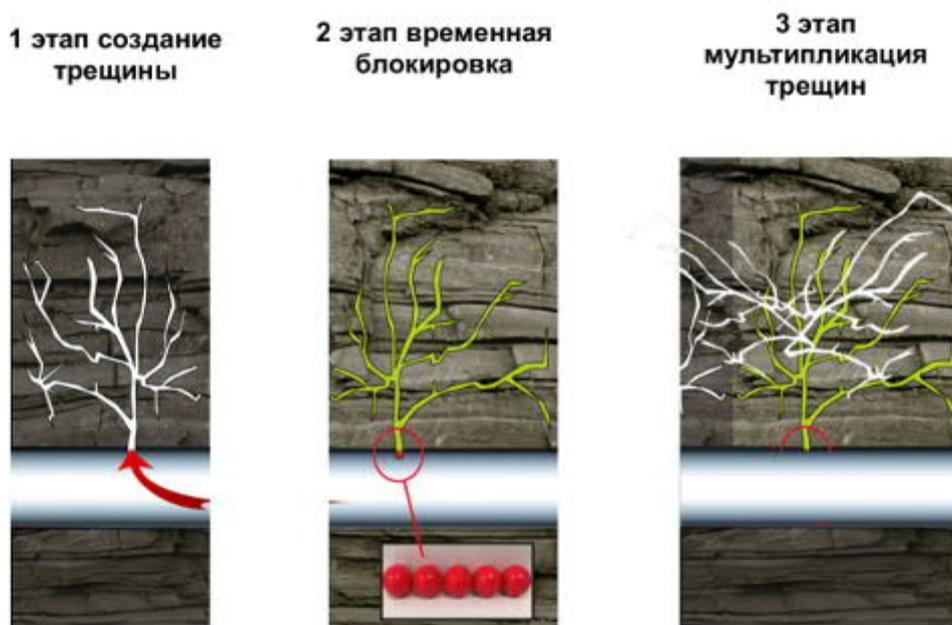


Рис. 7. Технология доставки проппанта

Проппантный состав Propel SSP компании Fairmount Santrol включает полимерное покрытие, нанесенное на частицы проппанта. Может использоваться для исключения таких компонентов, как добавки для повышения эффективности ГРП, включая гуар, сшиватели и понизители трения. На его основе возможно применение упрощенной системы жидкости ГРП для различных минерализации и жесткости воды.

Компанией Canadian Discovery проведен детальный анализ результатов строительства ГС с МГРП в Канаде в 2020 г. [2]. На рис. 8, а представлена средняя длина ГС в продуктивном пласте (часть рис.), на рис.8, б - число ступеней МГРП на скважинах Западно-Канадского осадочного бассейна в 2020 г. В отложениях Duverney отмечаются аномально высокие давления, которые позволяют использовать эту пластовую энергию для доставки нефти через протяженные горизонтальные стволы, длиной около 3 км. Соответственно и число ступеней МГРП в этих отложениях достигает 50 и более.

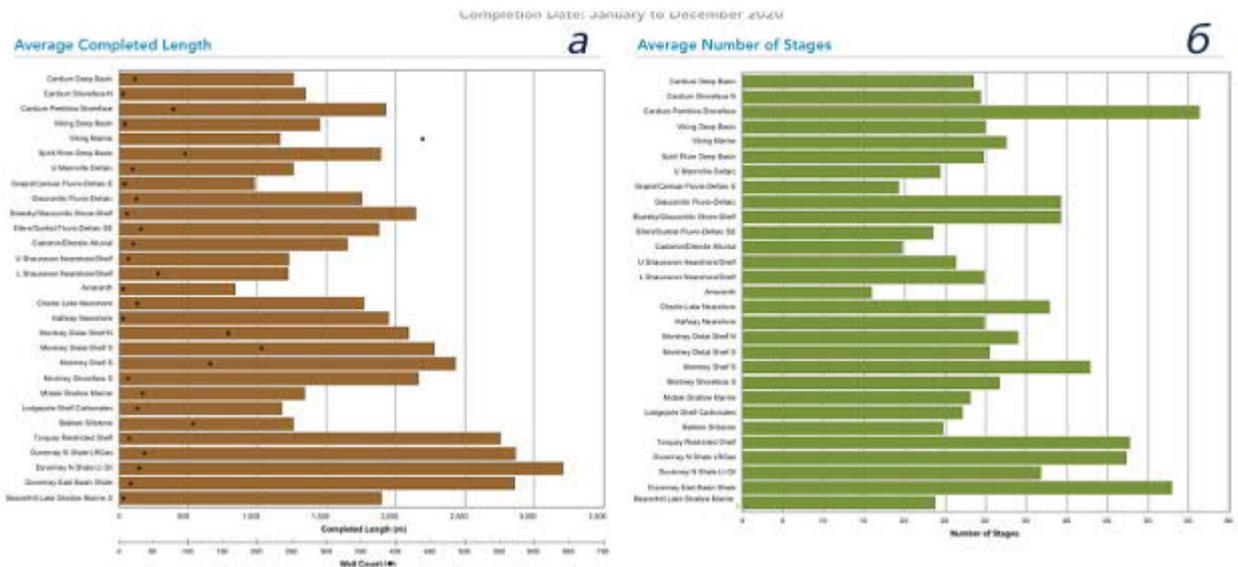


Рис. 8. Средняя длина ГС в продуктивном пласте (а) и число ступеней МГРП на скважинах Западно-Канадского осадочного бассейна (б) в 2020 г. (Canadian Discovery)

На рис. 9, а представлены средние величины массы пропанта и объемов жидкости ГРП на одну ступень, на рис. 9, б стоимости строительства ГС и МГРП в скважинах Западно-Канадского осадочного бассейна в 2020 г. Наиболее дорогостоящих скважины в отложениях Duverney, где которых и условия строительства ГС и процессы ГРП существенно дороже.

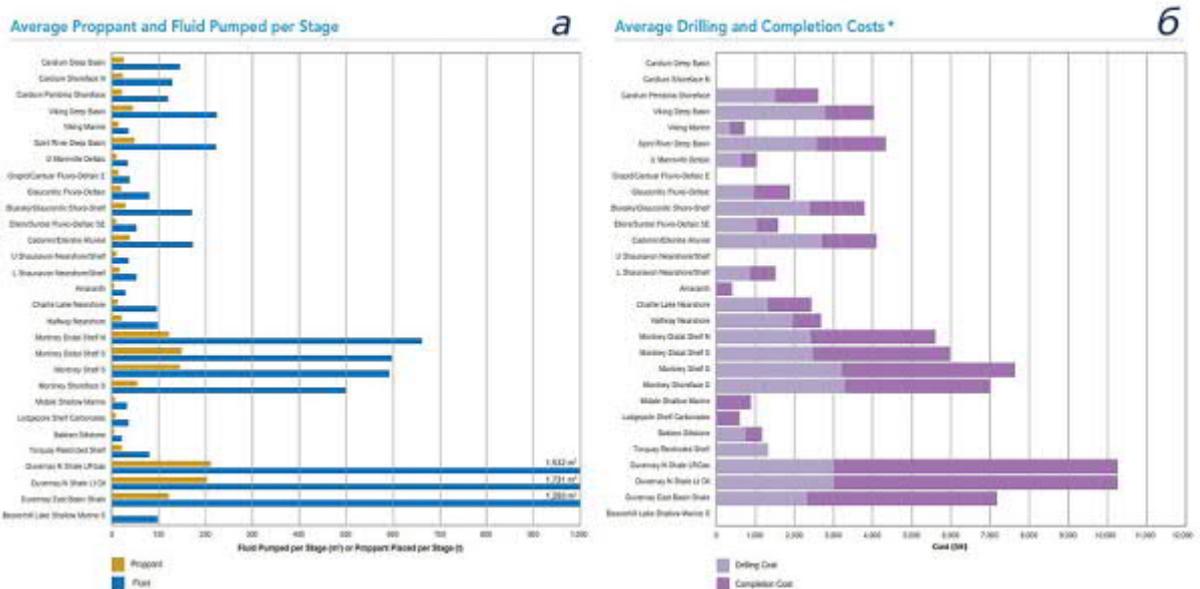
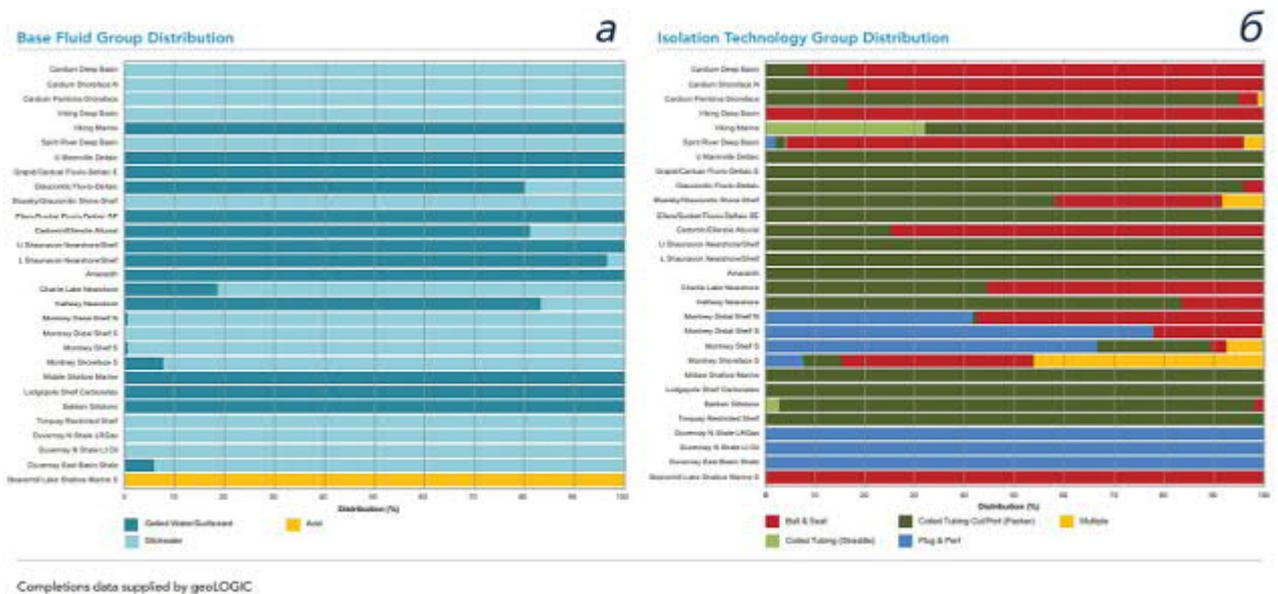


Рис. 9. Средние величины массы пропанта и объемов жидкости ГРП на одну ступень (а) и стоимости строительства ГС и МГРП (б) на скважинах в Западно-Канадском осадочном бассейне в 2020 г. (Canadian Discovery)

На рис. 10 (а) приведены типы жидкостей ГРП, на рис. 10, б – и виды скважинного оборудования ГРП Западно-Канадском осадочном бассейне в 2020 г.



Completions data supplied by geoLOGIC

**Рис. 10. Распределение по типам жидкостей ГРП, % (а)
 и виды скважинного оборудования ГРП, % (б) в Западно-Канадском осадочном бассейне
 в 2020 г. (Canadian Discovery).**

Основной объем работ по ГРП ведется на гелированных жидкостях и «скользящей» воде, кислотный ГРП применялся в 2020 г. только на одном объекте Beaverhill Lake. Среди технологий скважинного оборудования следует отметить преобладание проверенной технологии гикой трубы в сочетании с открываемыми, прорезаемыми портами, такими как «скользящие» шторки (sliding sleeves), технологии plug & perf, технологии шаровых муфт и технологии с гибкой трубой и мостовым пакером.

Энергетическое информационное агентство США (US EIA) на основе данных консалтинговой компании Enverus представило анализ по динамике средней длины ГС в продуктивном пласте (рис. 11), а также числа ГС (рис. 12) в кусте скважин (pad) Пермское осадочного бассейна (объекты Delaware и Midland) в 2011 г. – первой половине 2021 г. (рис. 12).

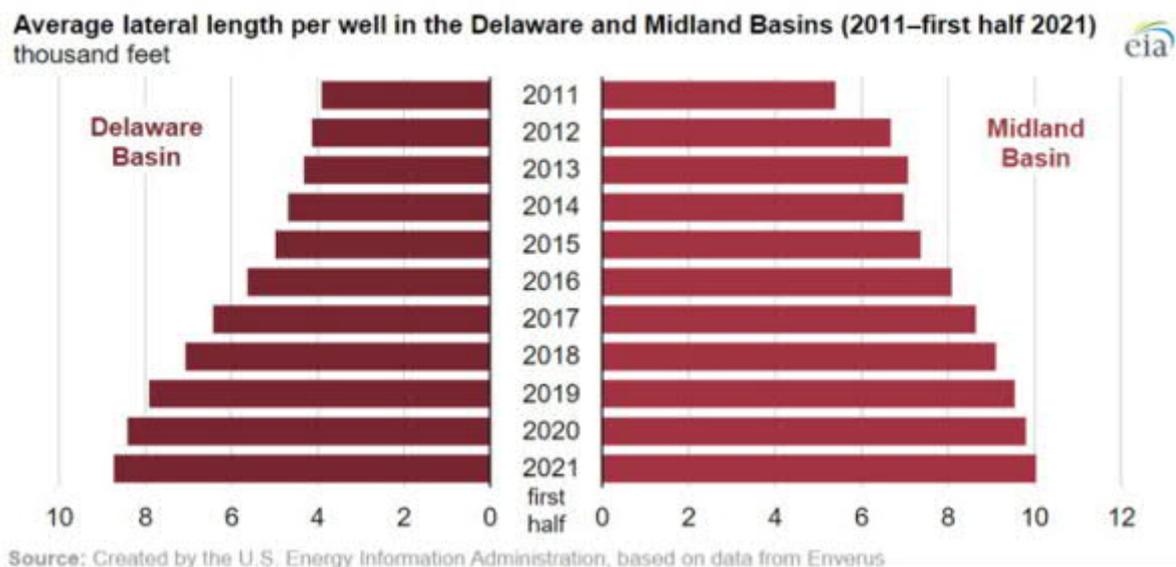


Рис. 11. Динамика средней длины ГС в продуктивном пласте объектах Пермского осадочного бассейна (объекты Delaware и Midland)

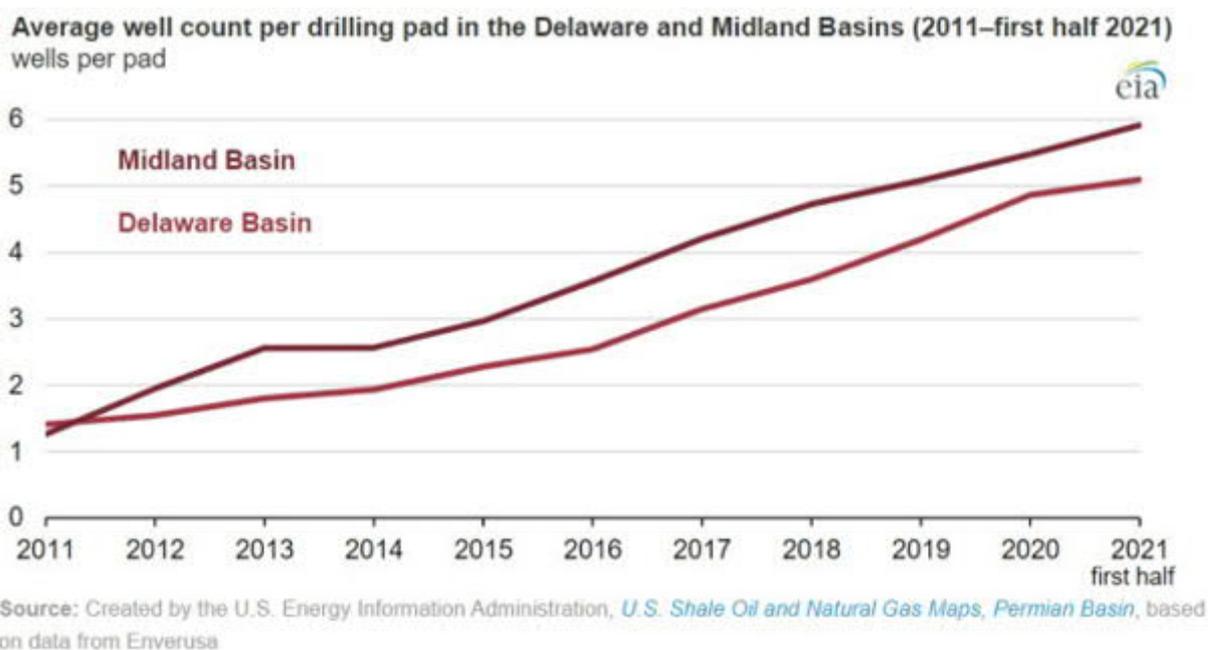


Рис. 12. Динамика числа ГС в кусте скважин (pad) Пермского осадочного бассейна (объекты Delaware и Midland)

Проведенный анализ подтверждает, что эффективность современных подходов к строительству ГС и проведенного МГРП достигается за счет повышения удельной производительности скважины (длина ГС в продуктивном пласте, число ступеней ГРП), так и максимального производительного времени оборудования на кусте (рост числа ГС в кусте). Для реализации таких интенсивных технологий применяются максимально производительная техника ГРП и высокие коэффициенты использования

дорогостоящего оборудования. В результате снижаются затраты времени на строительство ГС и проведение МГРП, а значит, и на пуск скважины в работу. Сегодняшний куст ГС в ходе реализации процесса строительства ГС с МГРП похож на большой завод с высокой удельной концентрацией техники и оборудования ГРП с минимальными затратами времени на переезд и монтаж/демонтаж.

В результате реализации эффективных методов разработки плотных коллекторов и отложений сланцев окупаемость этих проектов позволила продолжать их в Канаде и при снижении цен на нефть в кризисный период (рис. 13).



Рис.13. Окупаемость проектов разработки по объектам нетрадиционных запасов в Канаде (BMO Capital Market)

В целом практически все проекты разработки объектов в плотных коллекторах и сланцевых отложениях существенно эффективнее проектов разработки тяжелых нефтей и битумов в Канаде. Определенную роль в поддержании стабильности проектов добычи нефти в Канаде играют налоговые стимулы, в частности, связывающие величины налоговых ставок с мировыми ценами на нефть, а также со степенью технологичности строительства ГС с МГРП [1].

Выводы

1. Высокая эффективность современных технологий разработки нетрадиционных запасов в Северной Америке наряду с налоговыми стимулами позволяет придавать устойчивость процессам добычи таких малорентабельных ранее ресурсов даже в условиях низких цен на углеводороды.

2. Новые технологии МГРП направлены на минимизацию затрат и достижение максимальных притоков в самое короткое время. Для этого проводятся уплотнение ступеней ГРП по стволу, а также увеличение удельных объемов нагнетаемого проппанта на единицу длины ГС с повышенным расходом жидкости гидроразрыва.

3. Новая скважинная техника ГРП – муфты, ключи открытия муфт, позволяет сокращать затраты на использование дорогостоящего поверхностного оборудования. Новые компоненты жидкости ГРП и проппанты расширяют спектр создаваемых трещин и наращивают зоны трещиноватости.

Список литературы

1. *Ибатуллин Р.Р.* Опыт разработки запасов нефти в плотных коллекторах Северной Америки. Горизонтальные скважины и многоступенчатый ГРП // Георесурсы. – 2017. - Т.19. - №3. – С.148- 153
2. *Western Canada Recourse Plays with Drilling Activity - 2021 Q1-Q2/ canadiandiscovery.com*