

УДК 550.8.013

ПРОГНОЗ ОПТИМАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ  
СТВОЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЮРУБЧЕНО-ТОХОМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бойков О.И.

Научный руководитель д-р физ.-мат. наук Киселев В.М.

Сибирский федеральный университет

**Аннотация**

Продуктивные нефтегазоносные горизонты ряда месторождений Восточной Сибири приурочены к карбонатным рифейским отложениям. Отличительной особенностью этих месторождений, к числу которых относится Юрубчено-Тохомское месторождение (ЮТМ), является кавернозно-трещиноватый тип коллектора. Это обуславливает определенные сложности при извлечении углеводородов из таких коллекторов. Матрица пород блоков практически непроницаема. Следовательно, эффективный объем нефти и газа обеспечивается вторичной пустотностью: трещинами, полостями выщелачивания по трещинам и собственно кавернами. В единую гидродинамическую систему эти полости и каверны увязаны статистически упорядоченной системой микро- и макротрещин, что определяет ярко выраженную анизотропию проницаемости пласта–коллектора[1].

**Введение**

Результаты гидродинамических исследований скважин Юрубчено–Тохомского месторождения показали, что продуктивные объекты данного месторождения, весьма восприимчивы к изменению действующих нагрузок. Наблюдается существенная зависимость продуктивных скважин от падения пластового давления, непредсказуемая обводненность скважин, резкое падение их продуктивности, различие в десятки и сотни раз проницаемостей, полученных по керну и по ГДИС. Выполненный анализ результатов промысловых гидродинамических исследований в горизонтальных скважинах показал высокую неравномерность притока по стволу. При общей длине открытого горизонтального участка эксплуатационной скважины порядка 1000 м, суммарная длина приточных интервалов варьирует от 150 до 300 м. В то же время результаты интерпретации данных UVI (ультразвукового скважинного сканера) свидетельствуют о повсеместном наличии трещин, пересекающих горизонтальный ствол.

Причиной того, что не все трещины являются фильтрующими, может быть явление кольматации, во-первых. Достоверно оценить степень влияния кольматации на

снижение трещинной проницаемости не представляется возможным ввиду того, что на данный момент все испытанные горизонтальные скважины были пробурены на репрессии с использованием кольматантов. Провести данную оценку будет возможно после испытания уже пробуренных горизонтальных скважин на равновесии, так как данная технология предполагает меньшее загрязнение призабойной зоны. Во-вторых, закрытие трещин определенного азимутального направления вследствие горизонтальных тектонических напряжений. Данная причина выдвинута как гипотеза, поскольку по влиянию горизонтальных тектонических стрессов нет данных, и стоит обратить внимание на то, что современное направление тектонических стрессов не определить, необходимы специальные исследования например мини-групп. В-третьих, уменьшение апертуры под действием литостатического давления сжатия трещины в зависимости от угла ее падения.

Наряду с напряжениями, вызванными действием гравитационных сил (литостатическими напряжениями), в массивах горных пород существует поле тектонических напряжений, возникающих в результате тангенциального сжатия или растяжения земной коры. В первом приближении тектонические напряжения можно считать горизонтальными. Наряду с вертикальными и боковыми литостатическими напряжениями они могут оказывать влияние на апертуру трещин, с которой связана проницаемость пластов-коллекторов и, как следствие, продуктивность горизонтальных добывающих скважин. Опытные данные результатов замеров абсолютной газопроницаемости на стандартных образцах свидетельствуют о том, что матричную составляющую проницаемости рифейских карбонатных объектов можно условно принять величиной постоянной, в случае появления трещиноватости, проницаемость значительно увеличивается. Таким образом, основное внимание необходимо уделять изучению изменения трещинной составляющей проницаемости, и, в частности, процессов, ведущих к уменьшению раскрытости трещин. Исследованию влияния напряжений в массиве горных пород на продуктивность горизонтальных скважин посвящена настоящая работа.

### **Исследование связи линейной густоты и азимута трещин с продуктивными интервалами горизонтального ствола**

При проектировании и последующей эксплуатации добывающих скважин с горизонтальным окончанием было обнаружено следующее противоречие. Расчетные показатели добычи нефти кратно отличаются от фактических, в то время как

фильтрационно-ёмкостные свойства пород, использованные для расчетов, подтверждаются данными лабораторных исследований керна[2]. Для вертикальных скважин столь существенной разницы в расчетных показателях не было выявлено. В связи с этим была выдвинута гипотеза о корреляции притока и линейной густоты трещин.

В пяти скважинах ЮТМ, находящихся на относительно близком друг от друга расстоянии и относящихся к первоочередному участку разработки ЮТМ, была проведена запись профиля притока, по результатам которой были выделены интервалы, обеспечивающие приток к скважине. Во всех этих скважинах был прописан каротаж прибором UVI, который позволяет определить глубину трещины (точку пересечения ствола скважины трещиной), угол падения и азимут простирания. Связи между интервалами притока и густотой трещин не наблюдается. Аналогичный результат получен и по остальным рассмотренным скважинам. Таким образом, гипотеза о корреляции притока и линейной густоты трещин не подтвердилась.

#### **Связь давления сжатия трещин с продуктивностью горизонтальных скважин**

На основании данных о строении литолого-стратиграфического разреза рассматриваемого участка, о мощности каждого из литотипов (доломитов, солей, долеритов и др.), плотностей твердой фазы и пластового флюида был произведен расчет литостатического (вертикального) давления на уровне кровли продуктивного горизонта по формуле

$$P_{верт} = \sum_k [(1 - K_{nk})\rho_{rk} + K_{nk}\rho_{fk}] h_k \cdot g,$$

где  $K_{nk}$  – пористость,  $\rho_{rk}$  – плотность твердой фазы,  $\rho_{fk}$  – плотность жидкой фазы,  $g$  – ускорение силы тяжести. Все величины отнесены к  $k$  – му слою, мощность которого равна  $h_k$ ;  $H = \sum_k h_k$  – глубина залегания кровли продуктивного слоя.

Для расчета бокового горного давления была использована формула А.Н. Динника

$$P_{бок} = \zeta \cdot P_{верт},$$

где  $\zeta$  – коэффициент бокового распора, выражаемый через коэффициент Пуассона  $\sigma$ :

$$\zeta = \frac{\sigma}{1 - \sigma}.$$

Коэффициент Пуассона был определен в результате механических исследований керна, отобранного из рифейских отложений ЮТМ. Объем выборки составил 1500 образцов, среднее значение коэффициента Пуассона получилось равным 0,296. В соответствии с этим коэффициент  $\zeta$  был принят равным 0,42.

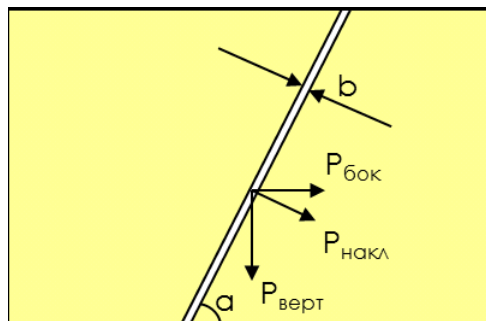


Рис 1. Схема распределения нагрузок на стенки наклонной трещины.  $b$  – апертура трещин. Остальные обозначения в тексте.

Давление сжатия трещины  $P_{накл}(\alpha)$ , имеющей угол наклона  $\alpha$ , в первом приближении в соответствии с (рис.1) можно представить как

$$P_{накл}(\alpha) = P_{верт} \cos \alpha + P_{бок} \sin \alpha = P_{верт}(\cos \alpha + \zeta \sin \alpha).$$

Добавками к боковому давлению, связанными с рельефом местности, пренебрежем в силу того, что глубина залегания кровли продуктивного горизонта много больше амплитуд изменений рельефа местности. Для каждого из пяти горизонтального стволов были рассчитаны и построены кривые давления сжатия с учетом данных UBI по трещиноватости. Сопоставление этих кривых с данными записи притока показало, что интервалы, из которых получен приток, характеризуются низкими давлениями сжатия трещины. Другими словами, продуктивные интервалы связаны с зонами пониженных давлений, где трещины имеют наибольшую раскрытость.

Все рассмотренные скважины, в которых выполнены записи профиля притока и измерения параметров трещиноватости, находятся на достаточно близком друг к другу расстоянии и достаточно равномерно охватывают первоочередной участок разработки ЮТМ. На основе данных о параметрах трещиноватости рифейских отложений по 15 скважинам (все горизонтальные скважины с данными UBI) в пределах первоочередного участка в программном продукте Petrel был построен куб углов падения трещин, который затем, с использованием приведенных выше формул, был пересчитан в куб

давлений сжатия трещин. Построенная на основе этих вычислений карта распределения давления сжатия трещин (карта раскрытости трещин), представлена на (рис.2).

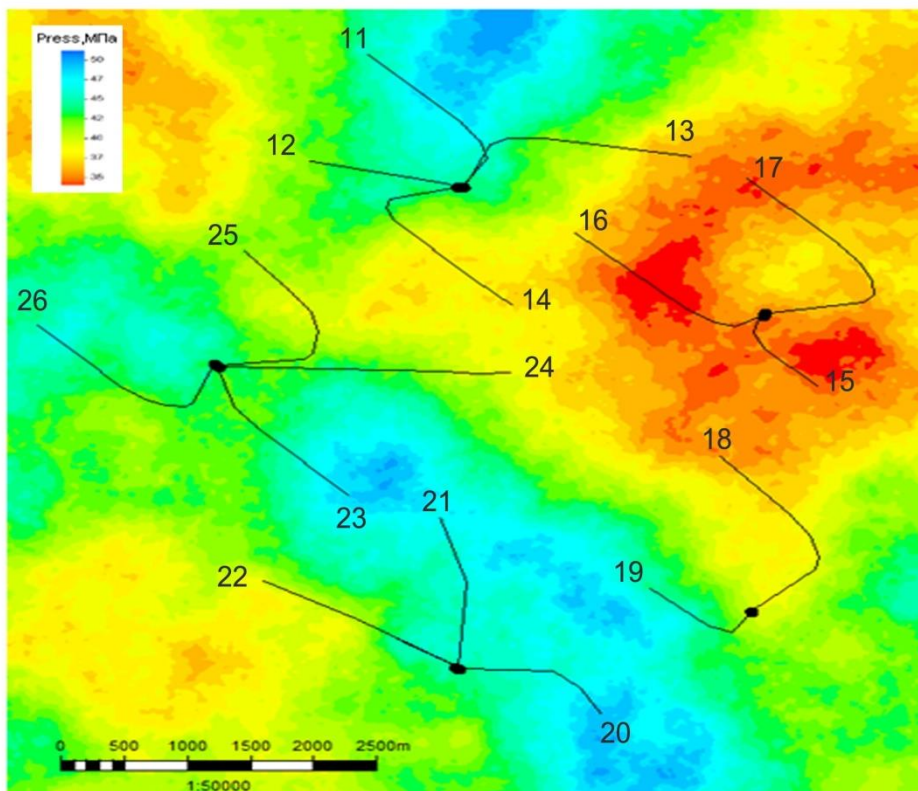


Рис 2 . Карта распределения давления сжатия трещин. Красный цвет – высокая раскрытость трещин, синим – низкая раскрытость.

Как можно видеть из рис.2, в наиболее перспективной зоне, характеризующейся наименьшим давлением сжатия трещин, расположены скважины № № 16, 17, 15. В то же время, скважины № 12 и № 11 находятся в зоне высоких давлений сжатия трещин, т.е. в зоне с минимальной апертурой трещин, и должны обладать низкими фильтрационно-емкостными характеристиками.

На рис.3 представлена зависимость продуктивности скважин, определенной по результатам испытаний, от давления сжатия трещин, принятого равным среднему значению по горизонтальному стволу скважины. Имеет место хорошо выраженная линейная связь: чем ниже давление сжатия трещин, тем выше продуктивность скважин. Скважина 15, согласно нашим расчетам располагается в наиболее перспективной зоне, имеет максимальную продуктивность, в то время как скважины 12 и 11 находятся в зоне высоких давлений сжатия трещин, имеют минимальное значение продуктивности.



Рис. 3. Зависимость между удельной продуктивностью скважин и давлением сжатия трещин.

По представленному алгоритму опубликованному в статье[4], были выделены направления горизонтальных стволов в рамках блоковой модели проницаемости. На рисунка 4 видно, что все выделенные нами направления располагаются в зонах с повышенной раскрытостью трещин.

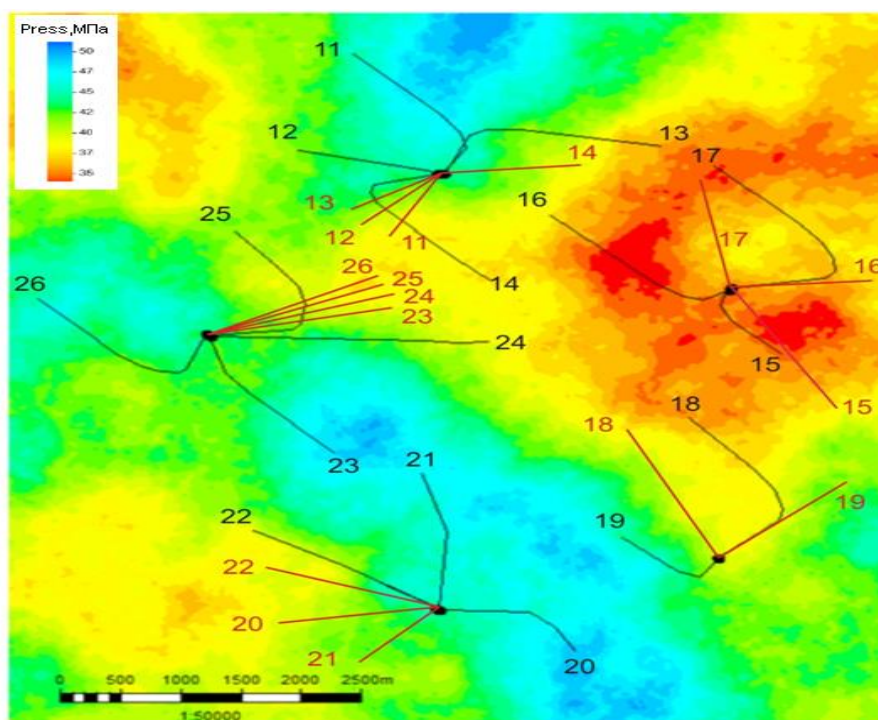


Рис. 4. Карта распределения давления сжатия трещин, красным цветом выделены направления рассчитанных горизонтальных стволов. Черным уже пробуренные горизонтальные стволы.

### Заключение

Был проанализирован большой объем информации, касающейся лабораторных исследований керна, данных геофизических и гидродинамических исследований

скважин, результатов испытаний. Рассмотрены данные по первоочередному участку разработки ЮТМ. Показано, что интервалы притока в горизонтальных скважинах не коррелируют с линейной густотой трещин и с их азимутами. Это позволило предположить, что основным фактором, определяющим продуктивность горизонтальных скважин, является литостатическое давление сжатия трещин. Была построена трехмерная модель трещиноватости и рассчитано давление сжатия трещин продуктивных рифейских отложений. На основе этой модели можно выделить наиболее перспективные зоны для размещения добывающих скважин. Дополнительно к этому еще учли анизотропию проницаемости трещиноватых коллекторов, вследствие чего оптимизировали направление горизонтальных стволов[3].

Предложенная методика может быть использована при разработке ряда месторождений Восточной Сибири, обладающих схожими условиями образования и особенностями строения. Учет влияния давления сжатия трещин на изменение их проницаемости позволяет выявить наиболее перспективные зоны для места заложения и азимута проводки горизонтального ствола добывающих скважин, что, в свою очередь, снизит вероятность бурения низкодебитных скважин. Кроме того, в условиях анизотропного строения трещинного пласта–коллектора реализация данного подхода позволит повысить достоверность прогноза дебита скважин при расчете и обосновании технологических параметров разработки за счет выявления эффективной рабочей длины горизонтального ствола скважины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киселев В.М., Кинсфатор А.Р., Чашков А.В.* Анизотропия проницаемости трещиноватых карбонатных коллекторов // Научно-технический Вестник ОАО «НК«Роснефть». – 2011. – №4 (25). – С. 10–14.
2. *Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1. – М.: Мир, 1985. – 374 с.
3. *Киселев В.М., Кинсфатор А.Р., Бойков О.И.* Расчет оптимального направления горизонтального ствола добывающей скважины в коллекторах Юрубчено-Тохомского месторождения // Современные технологии освоения минеральных ресурсов. Вып. 11. Красноярск: ИПК СФУ. 2013. С. 204–211.
4. *Киселев В.М., Кинсфатор А.Р., Антоненко А.А.* Применение блоковой модели проницаемости трещиноватых коллекторов при проектировании горизонтальных стволов скважин // Российская техническая нефтегазовая конференция, Москва 2012 г.