



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОМИССИЯ ПО ЗАПАСАМ
ЦЕНТРАЛЬНАЯ КОМИССИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
(ЦКР Роснедра)

Утверждаю

Председатель ЦКР Роснедра


В.В. Шелепов
«  2009 г.

ПРОТОКОЛ
заседания
(нефтяной секции)

от 03.12.2009 № 4752

г. Москва

Методические подходы к обоснованию выбора скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий на основе методов деревьев решений

Присутствовали:

В.В. Шелепов	– Председатель ЦКР Роснедра, Руководитель нефтяной секции
С.А. Жданов	– первый заместитель председателя ЦКР Роснедра, первый заместитель Руководителя нефтяной секции
Н.С. Пономарев	– заместитель Руководителя нефтяной секции
В.М. Малюгин	– ученый секретарь нефтяной секции

Члены ЦКР Роснедра (нефтяная секция): Андреева Н.Н., Ахапкин М.Ю., Баишев Б.Т., Васильев И.П., Давыдов А.В., Закиров С.Н., Иоффе О.П., Крянев Д.Ю., Кульпин Л.Г., Лебединец Н.П., Лысенко В.Д., Макеева Е.К., Максимов М.М., Соколов В.С., Судо Р.М., Храмов П.Ф., Шаевский О.Ю., Шагиев Р.Г., Ювченко Н.В., Юферов Ю.К., Яшин Ю.Н.

Приглашенные:

от ЗАО «Геоцентр «Минеральные ресурсы»: Красюкова О.К., Кузнецова Е.Б., Куприянов В.В., Кнышенко А.Г., Сидимиров С.М., Степанян Л.Г., Яковлев А.В.

от ОАО «НК «Роснефть»: Сысоев Ю.А., Савичев К.С., Суртаев В.Н.

от ОАО «ЛУКОЙЛ»: Коршунов А.Ю., Матвеев Л.П., Рошин А.Б.

- от ОАО «НГК «Славнефть»: Крикунов Н.В., Афонасин В.В.
- от ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз»: Галимсаров А.Г.
- от ОАО «Самаранефтегаз»: Пахшаев А.А., Белолипецкая Н.П.
- от ЗАО «Самара-Нафта»: Рыжов С.В., Ковалев А.А.
- от ООО «Динью»: Ширшиков А.А.
- от ОАО «ВНИИнефть»: Садчиков П.Б.
- от ЗАО «КОНКОРД»: Пичугин О.Н., Санников И.Н.
- от ООО «НТЦ-РуссНефть»: Федулов В.В.
- от ЗАО «Нефтепроект»: Минаев И.В.
- от ЗАО «ТИНГ»: Гнилицкий Р.А., Завьялов А.С., Рыков А.И., Смирнов Д.С., Чезганова О.Н.
- от ООО «ТюменьНИИпроект»: Дерябин Е.М.
- от ЗАО «ИНКОНКО»: Морганов Д.М., Мальцева Ю.В., Варнавская Л.С.
- от МГНК «Союзнефтегаз»: Чарыков В.Ф.

Слушали: доклад генерального директора ЗАО «КОНКОРД», к.ф-м.н. Пичугина О.Н. «Методические подходы к обоснованию выбора скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий на основе методов деревьев решений» (авторы: Мандрик И.Э. (ОАО «ЛУКОЙЛ»), Шкандратов В.В. (ООО «КогалымНИПИнефть»), Пичугин О.Н., Никифоров С.В., Санников И.Н., Богданова В.В. (ЗАО «КОНКОРД»))

В настоящее время в нефтедобывающей отрасли наметилась общая устойчивая тенденция ухудшения структуры остаточных запасов углеводородов, которая существенно осложняет задачу эффективной реализации геолого-технических мероприятий (ГТМ) и обуславливает необходимость совершенствования системы принятия решений. Проектирование ГТМ, как правило, включает в себя три основных этапа: выбор скважин-кандидатов; подбор оптимальной технологии на основе математического моделирования и оценка экономической эффективности проведенных мероприятий. Практический опыт реализации мероприятий свидетельствует, что ключевым фактором, в значительной степени определяющим успешность того или иного воздействия, является выбор скважин-кандидатов.

Понимание важности этой задачи обусловило создание коллективом авторов (А.Х. Мирзаджанзаде, Ю.В. Зайцев, Г.И. Григоращенко, Г.Г. Вахитов, О.Б. Качалов, В.О. Богопольский, О.В. Чубанов, В.И. Грайфер, Н.М. Шерстнев): «Методического руководства по выбору объектов для проведения методов воздействия на призабойную зону», которое было рекомендовано для практического применения в нефтедобывающих организациях и научно-исследовательских институтах Миннефтепрома. Безусловно, за тридцать пять лет, прошедших с момента появления этого документа, в отраслевой науке многое изменилось, наступила эра математического моделирования, которая открыла новые возможности в проектировании разработки месторождений. Однако, что касается прогнозирования мероприятий на скважинах, то здесь до сих пор остаются серьезные проблемы и сохраняется недостаточно высокий уровень успешности ГТМ.

Коллективом авторов настоящего доклада рассмотрены возможности предварительного выбора скважин-кандидатов для реализации геолого-технических мероприятий на основе применения методов «data mining» (интеллектуального анализа данных). Ядром аналитической системы стал метод деревьев решающих правил.

Рассмотрим применение данного подхода на примере решения задачи анализа и прогноза технологической эффективности гидравлического разрыва пласта (ГРП) на одном из крупных эксплуатационных объектов Западной Сибири.

Формирование информационной модели

Прогнозирующие свойства любой, самой совершенной системы, основанной на искусственном интеллекте, определяются набором исходных параметров. В данной работе использовалось более 50 параметров, которые условно были разбиты на следующие группы:

- Геологическое строение и фильтрационно-емкостные свойства.
- Продуктивность скважин.

- Текущее энергетическое состояние пласта.
- Состояние запасов.
- Состояние системы разработки.
- Технология ГРП.

Важно отметить, что стандартный набор параметров, описывающих геологические особенности пласта (толщина, проницаемость, расчлененность и т.д.), был дополнен признаком, характеризующим строение разреза скважин. В рамках предлагаемого подхода была реализована инженерная методика типизации разрезов скважин, основанная на математической обработке кривых альфа-ПС.

Среди параметров информационной модели, влияющих на эффективность ГРП важнейшую роль играют факторы, характеризующие наличие запасов в окрестностях скважины. Эти параметры определяются по результатам гидродинамического моделирования, либо с помощью методов характеристик вытеснения.

Применение комплекса методов прогнозирования

В соответствии со стандартной процедурой применения методов «data mining», технологическая цепочка решения задач прогнозирования включает в себя:

- Визуальную инспекцию данных, отбраковку данных, заполнение пропусков.
- Предварительный линейный анализ признаков пространства.
- Обучение нелинейных систем прогнозирования.
- Контроль качества обучения на тестовых выборках.
- Прогноз.

В работе использовался классификационный алгоритм построения деревьев решений. В связи с этим, целевой признак информационной матрицы был условно разбит на две категории: успешный и неуспешный ГРП по критерию прироста добычи нефти 2тыс.т./год на одну скважино-операцию, что в среднем соответствовало приросту дебита нефти 7 т/сут.

В соответствии с этим алгоритмом иерархический процесс построения дерева начинается с поиска наиболее селективного правила для корневой вершины, и далее продолжается для дочерних ветвей, пока не будут выполнены терминальные условия (минимальное количество примеров в узле, уровень доверия).

Преимущества использования деревьев решений:

- Быстрый процесс обучения.
- Извлечение правил на естественном языке.
- Интуитивно понятная классификационная модель.
- Высокая точность прогноза.
- Возможность интерактивного формирования иерархии правил.

Особенности прогнозирования.

В специализированной литературе, посвященной анализу эффективности методов машинного обучения, указывается на значительные преимущества использования не *единичных деревьев* решений, а *ансамблей деревьев* решений, или, как их еще называют, «лесов решений» (decision tree forests). Особенно хорошо эти

преимущества проявляются при невысоком объеме обучающей выборки. В этом случае представляется целесообразным строить множество «небольших» деревьев, но имеющих достаточно высокую поддержку на «терминальных листочках». При этом важно контролировать их обобщающую способность, добиваясь успешности прогноза, превышающей уровень 50%. Целесообразно формировать специализированные деревья, каждое из которых, дает прогноз с точки зрения определенной группы факторов (текущие запасы, геологические особенности, система разработки).

Комментируя структуру одного из деревьев решений, отметим, что успешность ГРП во многом определяется типом разреза пласта на скважинах и прилегающих к ним участках. Факторы, определяющие успешность ГРП различны для разных типов разреза (в прил.). Так, на скважинах с 5-м типом разреза, характеризующимся высокими коллекторскими свойствами в подошве пласта, важную роль играет наличие глинистых прослоев, отделяющих водонасыщенную часть пласта от вскрытой нефтенасыщенной. Интересно отметить зависимость успешности ГРП на скважинах с 7-м типом разреза от типа разреза скважин прилегающего участка. Так, успешность ГРП на скважине с 7-м типом разреза, находящейся на участке с преобладанием скважин третьего или четвертого типов, будет низкой с вероятностью 85%. В случае же, когда скважина с 7-м типом разреза находится в окружении скважин этого же типа, вероятность низкой успешности составляет всего 44%.

Построенный «лес решений» был положен в основу примененной системы прогнозирования. Окончательный прогноз формировался на основе простого «голосования» всех деревьев решений. Средний уровень успешности прогноза, зафиксированный в процессе *тестирования* на контрольных выборках, составил 74%. Таким образом, применение данной системы для выбора скважин-кандидатов позволит повысить успешность реализации ГРП по сравнению с текущим уровнем на 15-20%.

Аналитические возможности.

Значительный потенциал применения *деревьев решающих правил* кроется в уникальной возможности их использования для оценки причин низкой эффективности выполненных мероприятий. Фиксируемая в процессе обучения деревьев иерархия правил позволяет выполнять такую работу над ошибками в автоматизированном режиме, в результате чего для каждого выполненного ГРП определяется набор причин, с высокой вероятностью обусловивших его неуспешность. Данная процедура была отработана на анализируемом объекте и в результате получена сводная таблица причин неуспешности всех ранее выполненных операций ГРП.

Аналитические возможности *деревьев решений* не ограничиваются только лишь анализом причин неуспешности ГРП. Представляется весьма полезным их использование для оценки критических значений технологических факторов ГРП. Для этого рассматривается область признакового пространства с заведомо высоким риском выполнения гидроразрыва, например, на скважинах с тонкими глинистыми разделами, отделяющими нефтенасыщенную зону пласта от водонасыщенной. В этих областях, как правило, значимость технологических факторов резко возрастает, что дает возможность сформулировать ограничения на диапазон изменения технологических параметров (удельная масса пропанта, темп закачки, концентрация

пропанта и т.д.). По анализируемому объекту в качестве критических факторов, с точки зрения риска обводнения скважины, были установлены критерии для удельной массы пропанта (>2.6 т/м) и темпа закачки (>4.2 м³/мин).

В заключение следует отметить, что предлагаемая система содержит в себе элементы самоконтроля, которые создают серьезные предпосылки для ее успешного использования. Во-первых, благодаря своей прозрачности, система обеспечивает возможность контроля получаемых правил экспертами. Во-вторых, обученные деревья решений проходят обязательный жесткий экзамен на тестовых выборках, которые содержат в себе примеры, не использовавшиеся при обучении.

Предлагаемая технология была апробирована при решении задач выбора скважин-кандидатов под реализацию ГРП, для бурения боковых стволов и выполнения переводов скважин с объекта на объект на крупных месторождениях Западной Сибири и Казахстана, в рамках проектных работ.

Основные выводы:

1. Предложена и опробована технология формализованного анализа накопленной исторической информации о выполненных ГТМ, позволяющая извлекать знания, необходимые для повышения успешности мероприятий в будущем.
2. Обнаружен значительный потенциал использования деревьев решающих правил для оперативной оценки причин низкой эффективности выполненных ГТМ.
3. Предложена и опробована методика выбора скважин-кандидатов для реализации ГТМ на основе комитета методов машинного обучения;
4. Исходя из тестовых оценок качества прогноза созданной интеллектуальной системы, ожидаемый абсолютный прирост успешности ГТМ от ее внедрения дополнительно к применяемым стандартным подходам составит 15-20%. (по оценке авторов).
5. Максимальную эффективность от использования интеллектуальной системы прогнозирования можно получить только при наличии обратной связи, то есть в режиме непрерывного сопровождения работ по реализации мероприятий на скважинах.

На представленный доклад получены отзывы экспертов ЦКР Баишева Б.Т., Жданова С.А., Сиятского М.В.

В обсуждении приняли участие: Баишев Б.Т., Жданов С.А., Храмов П.Ф., Коршунов А.Ю., Лысенко В.Д., Ахапкин М.Ю., Кульпин Л.Г., Закиров С.Н., Шагиев Р.Г., Андреева Н.Н., Иоффе О.П., Яшин Ю.Н., Судо Р.М., Шелепов В.В.

ЦКР Роснедра (нефтяная секция) ОТМЕЧАЕТ:

1. Своевременность и необходимость развития и совершенствования методов анализа и прогноза эффективности геолого-технических мероприятий.
2. На примере проведения операций гидравлического разрыва пласта авторами доклада проделана работа по обобщению и систематизации накопленного

Сидор А.В. Иванов

опыта его реализации с целью выявления устойчивых зависимостей эффективности ГРП от различных геолого-технологических факторов.

3. Основными преимуществами предлагаемого авторами подхода к выбору скважин для проведения ГТМ являются: высокий уровень формализации; учет как положительного, так и отрицательного накопленного опыта реализации мероприятий; устойчивость к погрешностям в исходных данных.

4. Использование комплекса методов позволяет компенсировать недостатки каждого из них и тем самым повысить точность прогноза.

ЦКР Роснедра (нефтяная секция) ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. Доклад «Методические подходы к обоснованию выбора скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий на основе методов деревьев решений» одобрить.

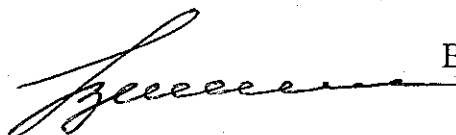
2. Рекомендовать пользователям недр и проектным организациям рассматривать возможность использования при проектировании ГТМ подходов, предлагаемых авторами настоящего доклада.

3. Рекомендовать авторам доклада:

3.1. Продолжить апробацию новых методических подходов выбора скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий на разных видах ГТМ.


3.2. По итогам рассмотрения опубликовать представленные материалы в журналах «Вестник ЦКР Роснедра» и «Недропользование XXI век».

Руководитель нефтяной секции



В.В. Шелепов

Ученый секретарь нефтяной секции



В.М. Малюгин



Методические подходы к обоснованию выбора скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий

И.Э.Мандрик (ОАО «ЛУКОЙЛ»), В.В.Шкандратов (ООО «КогалымНИПИнефть»),
О.Н.Пичугин, И.Н.Санников, С.В.Никифоров, В.В.Богданова (ЗАО «КОНКОРД»)

В настоящее время в нефтедобывающей отрасли наметилась общая устойчивая тенденция ухудшения структуры остаточных запасов углеводородов, которая существенно осложняет задачу эффективной реализации геолого-технических мероприятий (ГТМ) и обуславливает необходимость совершенствования системы принятия решений. Проектирование ГТМ, как правило, включает в себя три основных этапа: выбор скважин-кандидатов; подбор оптимальной технологии на основе математического моделирования и оценка экономической эффективности. Практический опыт реализации мероприятий свидетельствует, что ключевым фактором, в значительной степени определяющим успешность того или иного воздействия, является выбор скважин-кандидатов.

Понимание важности этой задачи обусловило создание коллективом выдающихся авторов (А.Х.Мирзаджанзаде, Ю.В.Зайцев, Г.И.Григорашенко, Г.Г.Вахитов, О.Б.Качалов, В.О.Богопольский, О.В.Чубанов, В.И.Грайфер, Н.М.Шерстнев) документа: «Методическое руководство по выбору объектов для проведения методов воздействия на призабойную зону» [1], который был утвержден в 1974 году и рекомендован для практического применения в нефтедобывающих организациях и научно-исследовательских институтах Миннефтепрома. Безусловно, за тридцать пять лет, прошедших с момента появления этого документа, в отраслевой науке многое изменилось, наступила эра математического моделирования, которая открыла новые возможности в проектировании разработки месторождений. Однако, что касается прогнозирования мероприятий на скважинах, то здесь до сих пор остаются серьезные проблемы и сохраняется недостаточно высокий уровень успешности ГТМ. Связано это, в первую очередь, с использованием объективно не вполне адекватных математических моделей, описывающих технологии воздействия на прискважинную зону пласта, а также во многих случаях, с низким качеством исходных данных [2]. При этом «Методическое руководство...», несмотря на значительный потенциал использования предлагаемых там алгоритмов, оказалось преданным забвению. Таким образом, из одной крайности, когда применялись только аналитические и статистические методы, мы переметнулись в другую крайность, когда используются в основном только методы математического моделирования. Представляется более эффективным использование обоих подходов на основе объединения их в единую технологическую цепочку проектирования ГТМ.

Коллективом авторов настоящего доклада рассмотрены возможности предварительного выбора скважин-кандидатов для реализации геолого-технических мероприятий на основе применения методов «data mining» [3]. Ядром аналитической системы стал комитет деревьев решающих правил. Как показано в работе [4], объединение методов в комитет позволяет повысить точность прогноза и качество аналитических выводов.

Рассмотрим применение данного подхода на примере решения задачи анализа и прогноза технологической эффективности ГРП на одном из крупных эксплуатационных объектов Западной Сибири.

Формирование информационной модели

Прогнозирующие свойства любой, самой совершенной системы, основанной на искусственном интеллекте, определяются набором исходных параметров. В данной работе матрица входных признаков включала в себя более 50 параметров, которые условно были разбиты на следующие группы:

- Геологическое строение и фильтрационно-емкостные свойства.
- Продуктивность скважин.

- Текущее энергетическое состояние пласта.
- Состояние запасов.
- Состояние системы разработки.
- Технология ГРП.

Важно отметить, что стандартный набор параметров, описывающих геологические особенности пласта (толщина, проницаемость, расчлененность и т.д.), был дополнен признаком, характеризующим строение разреза скважин. В рамках предлагаемого подхода была реализована инженерная методика типизации разрезов скважин, основанная на математической обработке кривых альфа-ПС [5].

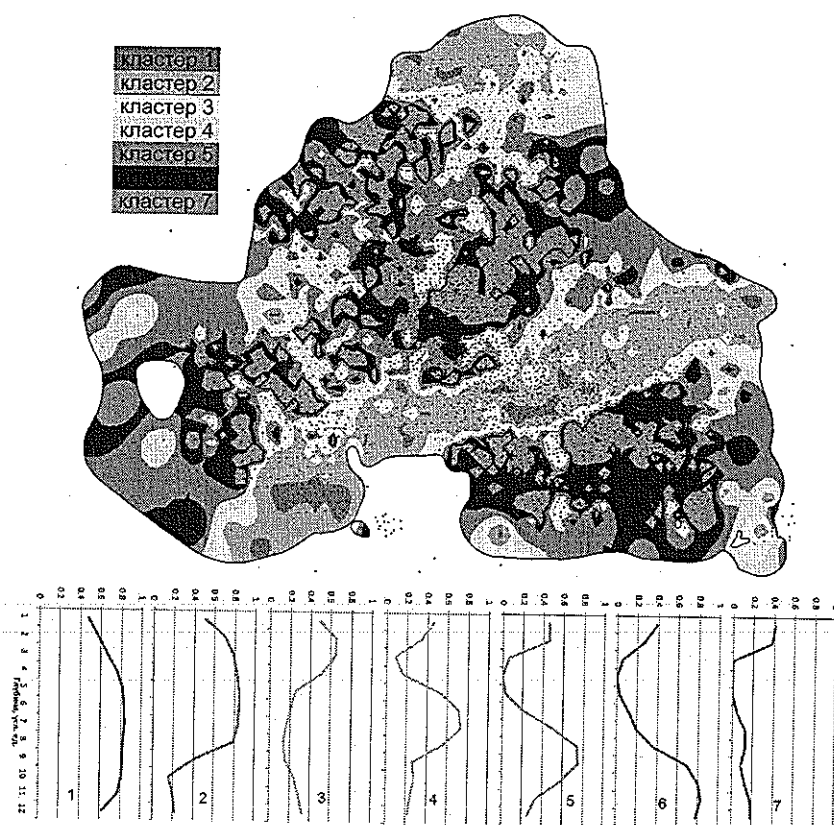


Рис. 1. Карта типов разрезов пласта на скважинах анализируемого объекта разработки.

(ниже приведены семь выделенных характерных типов кривых альфа-ПС)

Необходимо отметить, что карты выявленных типов разрезов (рис.1) носят интерпретируемый с точки зрения осадконакопления характер и могут быть основой для решения задач оптимизации разработки, для обоснования регионализации фазовых проницаемостей и для выполнения детального фацеального анализа.

Среди параметров информационной модели, влияющих на эффективность ГРП важнейшую роль играют факторы, характеризующие наличие запасов в окрестностях скважины. Эти параметры определяются по результатам гидродинамического моделирования, либо с помощью методов характеристик вытеснения.

Применение комитета методов прогнозирования

В соответствии со стандартной процедурой применения методов «data mining», технологическая цепочка решения задач прогнозирования включает в себя:

- Визуальную инспекцию данных, отбраковку данных, заполнение пропусков.
- Предварительный линейный анализ признакового пространства.
- Обучение нелинейных систем прогнозирования.

- Контроль качества обучения на тестовых выборках.
- Прогноз.

В работе использовался известный классификационный алгоритм построения деревьев решений (C4.5, впервые предложенный Р.Куинленом [6]). В связи с этим, целевой признак информационной матрицы был условно разбит на две категории: успешный и неуспешный ГРП по критерию прироста добычи нефти 2тыс.т./год на одну скважино-операцию, что в среднем соответствовало приросту дебита нефти 7 т/сут.

В соответствии с этим алгоритмом иерархический процесс построения дерева начинается с поиска наиболее селективного правила для корневой вершины, и далее продолжается для дочерних ветвей, пока не будут выполнены терминальные условия (минимальное количество примеров в узле, уровень доверия).

ЕСЛИ	Прогноз прир.нефти	Подд.	Дост.
Плотность остаточных ИЗ по участку с ГРП на дату ГРП, тыс. т/га < 1		48	30
Плотность остаточных ГЗ по участку с ГРП на дату ГРП, тыс. т/га < 5	до 7 т/сут	6	5
Плотность остаточных ГЗ по участку с ГРП на дату ГРП, тыс. т/га >= 5		22	12
Накопленная компенсация на укрупненном участке на дату ГРП, % < 150		16	11
APS по скважине с ГРП по нефт. части < 0.67		8	4
Суммарная толщина глин между вскрытой нефтью и водой на скважине с ГРП, м < 10	до 7 т/сут	4	3
Суммарная толщина глин между вскрытой нефтью и водой на скважине с ГРП, м >= 10	от 7 т/сут	4	3
APS по скважине с ГРП по нефт. части >= 0.67	от 7 т/сут	8	7
Накопленная компенсация на укрупненном участке на дату ГРП, % >= 150	до 7 т/сут	6	5
Плотность остаточных ИЗ по участку с ГРП на дату ГРП, тыс. т/га >= 1		20	15
Прерывистость пласта на участке с ГРП < 0.3	от 7 т/сут	6	5
Прерывистость пласта на участке с ГРП >= 0.3	до 7 т/сут	14	14

Рис.2. Дерево решающих правил, определяющее успешность ГРП по приросту дебита нефти.

В качестве примера рассмотрим структуру правил, определяющих успешность ГРП по приросту дебита нефти (рис.2). Из рис.2 следует, что наиболее селективным параметром, определяющим успешность ГРП, является плотность остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ). При высокой плотности ОИЗ ГРП неуспешен в прерывистом пласте, а при низкой – в зонах с низкими остаточными геологическими запасами (ОГЗ). Если ОИЗ и ОГЗ присутствуют на участке в достаточном количестве, то успешные ГРП характеризуются следующими комплексами геолого-технологических условий: умеренная компенсация отборов жидкости закачкой на участке, либо высокие фильтрационные свойства пласта (большие значения параметра «альфа-ПС») в сочетании с большой толщиной глинистых прослоев, отделяющих вскрытую нефтенасыщенную часть пласта от водонасыщенных пропластков.

Преимущества использования деревьев решений:

- Быстрый процесс обучения.
- Извлечение правил на естественном языке.
- Интуитивно понятная классификационная модель.
- Высокая точность прогноза.
- Возможность интерактивного формирования иерархии правил.

Особенности прогнозирования.

В специализированной литературе [7, 8], посвященной анализу эффективности методов машинного обучения, указывается на значительные преимущества использования не *единичных деревьев решений*, а *ансамблей деревьев решений*, или, как их еще называют, «лесов решений» (decision tree forests). Особенно хорошо эти преимущества проявляются при невысоком объеме обучающей выборки. В этом случае представляется целесообразным строить множество «небольших» деревьев, но имеющих достаточно высокую поддержку на «терминальных

листочках». При этом важно контролировать их обобщающую способность, добиваясь успешности прогноза, превышающей уровень 50%.

Целесообразно формировать специализированные деревья, каждое из которых, дает прогноз с точки зрения определенной группы факторов (текущие запасы, геологические особенности, система разработки). В качестве иллюстрации на рис.2 и 3 представлены два таких дерева, входящие в комитет, первое из которых дает прогноз на основе сложившихся к моменту ГРП особенностей извлечения запасов нефти, а второе отражает зависимость успешности ГРП от типа разреза пласта и параметров системы разработки.

ЕСЛИ	Прогноз прир. нефти	Подд.	Дост.
Тип разреза скважины с ГРП = 3		27	19
Накопленная обводненность участка с ГРП на дату ГРП, % < 51	от 7 т/сут	19	17
Накопленная обводненность участка с ГРП на дату ГРП, % >= 51	до 7 т/сут	8	6
Тип разреза скважины с ГРП = 4	до 7 т/сут	5	5
Тип разреза скважины с ГРП = 5		8	5
Суммарная толщина глин между вскрытой нефтью и водой на скважине с ГРП, м < 76	до 7 т/сут	3	3
Суммарная толщина глин между вскрытой нефтью и водой на скважине с ГРП, м >= 76	от 7 т/сут	5	3
Тип разреза скважины с ГРП = 6		15	10
Плотность сетки скважин на участке с ГРП, га < 39	до 7 т/сут	9	8
Плотность сетки скважин на участке с ГРП, га >= 39	от 7 т/сут	6	4
Тип разреза скважины с ГРП = 7		33	19
Тип разреза скважин участка с ГРП = 3	до 7 т/сут	10	8
Тип разреза скважин участка с ГРП = 4	до 7 т/сут	3	3
Тип разреза скважин участка с ГРП = 5	до 7 т/сут	2	1
Тип разреза скважин участка с ГРП = 6	от 7 т/сут	2	2
Тип разреза скважин участка с ГРП = 7		16	9
Суммарная толщина глин между вскрытой нефтью и водой на скважине с ГРП, м < 83	до 7 т/сут	4	4
Суммарная толщина глин между вскрытой нефтью и водой на скважине с ГРП, м >= 83		12	9
Расстояние до ближайшей нагнетательной скважины, м < 450	до 7 т/сут	4	3
Расстояние до ближайшей нагнетательной скважины, м >= 450	от 7 т/сут	8	8

Рис.3. Дерево решающих правил, учитывающее типизацию разреза пласта на скважинах с ГРП и окружающих их участках, а также параметры, характеризующие систему разработки участков.

Из дерева решений, представленного на рис.3, следует, что успешность ГРП определяется типом разреза пласта на скважинах и прилегающих к ним участках. Факторы, определяющие успешность ГРП различны для разных типов разреза. Так, на скважинах с 5-м типом разреза (рис.1), характеризующимся высокими коллекторскими свойствами в подошве пласта, важную роль играет наличие глинистых прослоев, отделяющих водонасыщенную часть пласта от вскрытой нефтенасыщенной. Интересно отметить зависимость успешности ГРП на скважинах с 7-м типом разреза от типа разреза скважин прилегающего участка. Так, успешность ГРП на скважине с 7-м типом разреза, находящейся на участке с преобладанием скважин третьего или четвертого типов, будет низкой с вероятностью 85% (по факту - 11 неуспешных из 13). В случае же, когда скважина с 7-м типом разреза находится в окружении скважин этого же типа, вероятность низкой успешности составляет всего 44% (по факту - 7 неуспешных из 16).

Таким образом, было построено несколько деревьев решений. Этот «лес решений» и был положен в основу примененной системы прогнозирования. Окончательный прогноз формировался на основе простого «голосования» всех деревьев решений.

Средний уровень обучения деревьев решающих правил по анализируемому объекту разработки составил 79%. Средний уровень успешности прогноза, зафиксированный в процессе тестирования на контрольных выборках, составил 74%. Таким образом, применение данной системы для выбора скважин-кандидатов позволит повысить успешность реализации ГРП по сравнению с текущим уровнем на 15-20%.

Аналитические возможности.

Значительный потенциал применения *деревьев решающих правил* кроется в уникальной возможности их использования для оценки причин низкой эффективности выполненных мероприятий. Фиксируемая в процессе обучения деревьев иерархия правил позволяет выполнять такую работу над ошибками в автоматизированном режиме, в результате чего для каждого выполненного ГРП определяется набор причин, с высокой вероятностью обусловивших его неуспешность. Данная процедура была отработана на анализируемом объекте и в результате получена сводная таблица причин неуспешности всех ранее выполненных операций ГРП. Выделены четыре группы причин неуспешности ГРП и представлены комплексы критериев, вскрывающие причины неуспешности каждого ГРП. Анализ таблицы показал, что в большинстве случаев на данном объекте разработки неуспешность ГРП объясняется неудачным выбором скважин (недостаточно запасов, тонкие глинистые перемычки, близость к нагнетательным скважинам). Лишь в отдельных случаях можно было изменить параметры технологии ГРП так, чтобы избежать осложнений в виде резкого обводнения или низкого прироста дебита жидкости.

ЕСЛИ	Прогноз прир. обв.	Подд.	Дост.
Толщина глинистого экрана на скважине с ГРП, м < 5.5		88	52
Остаточная нефтенасыщенность по участку с ГРП на дату ГРП, % < 40	от 20%	51	27
Остаточная нефтенасыщенность по участку с ГРП на дату ГРП, % >= 40		7	7
Темп закачки проппанта, м ³ /мин < 4.2		44	24
Удельная масса проппанта в пласте, т/м < 2.6		37	23
Расстояние до ближайшей нагнетательной скважины, м < 400	от 20%	29	21
Расстояние до ближайшей нагнетательной скважины, м >= 400	до 20%	4	3
Удельная масса проппанта в пласте, т/м >= 2.6	от 20%	25	20
Темп закачки проппанта, м ³ /мин >= 4.2	от 20%	8	6
Толщина глинистого экрана на скважине с ГРП, м >= 5.5	от 20%	7	6
Расстояние до ближайшей нагнетательной скважины, м < 450		37	28
Расстояние до ближайшей нагнетательной скважины, м >= 450	от 20%	3	3
	до 20%	34	28

Рис.4. Дерево решающих правил, отражающее влияние параметров технологии ГРП на прирост обводненности.

Аналитические возможности *деревьев решений* не ограничиваются только лишь анализом причин неуспешности ГРП. Представляется весьма полезным их использование для оценки критических значений технологических факторов ГРП. Для этого рассматривается область признакового пространства с заведомо высоким риском выполнения гидроразрыва, например, на скважинах с тонкими глинистыми разделами, отделяющими нефтенасыщенную зону пласта от водонасыщенной (рис.4). В этих областях, как правило, значимость технологических факторов резко возрастает, что дает возможность сформулировать ограничения на диапазон изменения технологических параметров (удельная масса проппанта, темп закачки, концентрация проппанта и т.д.). По анализируемому объекту в качестве критических факторов, с точки зрения риска обводнения скважины, были установлены критерии для удельной массы проппанта (>2.6 т/м) и темпа закачки (>4.2 м³/мин).

В заключение следует отметить, что предлагаемая система содержит в себе элементы самоконтроля, которые создают серьезные предпосылки для ее успешного использования. Во-первых, благодаря своей прозрачности, система обеспечивает возможность контроля получаемых правил экспертами. Во-вторых, обученные деревья решений проходят обязательный жесткий экзамен на тестовых выборках, которые содержат в себе примеры, не использовавшиеся при обучении.

Предлагаемая технология была апробирована при решении задач выбора скважин-кандидатов под реализацию ГРП, для бурения боковых стволов и выполнения переводов

скважин с объекта на объект на ряде месторождений Казахстана, а также на крупных месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

Выводы

1. Предложена и опробована технология формализованного анализа накопленной исторической информации о выполненных ГТМ, позволяющая извлекать **знания**, необходимые для повышения успешности мероприятий в будущем.
2. Обнаружен значительный потенциал использования деревьев решающих правил для оперативной **оценки причин** низкой эффективности выполненных ГТМ.
3. Предложена и опробована методика выбора скважин-кандидатов для реализации ГТМ на основе **комитета** методов машинного обучения;
4. Исходя из тестовых оценок качества прогноза созданной интеллектуальной системы, ожидаемый абсолютный прирост успешности ГТМ от ее внедрения дополнительно к применяемым стандартным подходам составит **15-20%**.
5. Максимальную эффективность от использования интеллектуальной системы прогнозирования можно получить только при наличии обратной связи, то есть в режиме **непрерывного** сопровождения работ по реализации мероприятий на скважинах.

Литература

1. А.Х.Мирзаджанзаде, Ю.В.Зайцев, Г.И.Григоращенко, Г.Г.Вахитов, О.Б.Качалов, В.О.Богопольский, О.В.Чубанов, В.И.Грайфер, Н.М.Шерстнев Методическое руководство по выбору объектов для проведения методов воздействия на призабойную зону, Москва, ОНТИ ВНИИ, 1974г.
2. Vincent M.C. Examining Our Assumptions – Have Oversimplifications Jeopardized Our Ability To Design Optimal Fracture Treatments? // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas, USA, 19-21 January 2009. (SPE 119143).
3. Christian Oberwinkler, Gerhard Ruthammer, Georg Zangl and Michael J.Economides New Tools for Fracture Design Optimization 2004, (SPE 86467).
4. Терехов С.А. Гениальные комитеты умных машин // IX Всероссийская науч.-тех. конф. «Нейроинформатика-2007»: Лекции по нейроинформатике. – Ч. 2. – М.: МИФИ, 2007. – 148 с.
5. Пичугин О.Н., Никифоров С.В., Шубин А.С., Санников И.Н., Богданова В.В. Оптимизация разработки месторождений на основе бурения боковых стволов. Концепция, методика, инструментарий // Интервал, 2008, № 7, С. 38 – 45.
6. Quinlan R. C4.5 Programs for Machine Learning. Morgan Kaufmann, San Mateo, California, 1993.
7. Breiman L. Random Forests. Machine Learning, Vol. 45, P. 5–32, 2001.
8. Dietterich T.G. An Experimental Comparison of Three Methods for Constructing Ensembles of Decision Trees: Bagging, Boosting, and Randomization. Machine Learning, Vol. 40, P. 139–157, 2000.