

УДК 622.245+622.279.7

**Н.С. Акелян, С.Б. Бекетов**

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ  
ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОЛОГО-  
ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА**

*Приведено описание методического подхода к оценке прогнозных показателей эффективности проведения геолого-технических мероприятий с целью повышения производительности скважин нефтяных и газовых месторождений.*

*Ключевые слова: нефть, газ, скважина, прогноз, модель.*

---

Одной из основных проблем разработки нефтяных и газовых месторождений является прогнозирование прироста добычи нефти при проведении различных мероприятий по увеличению нефтегазоотдачи. Особое значение такой прогноз приобретает на поздней стадии разработки месторождений, когда в продукции скважин присутствует большое количество воды, их дебиты снижены по сравнению с начальными, а в продуктивных пластах происходят снижающие фильтрационно-емкостные свойства техногенные процессы, связанные с отбором флюидов. Несмотря на значительные успехи нефтепромысловой науки, достигнутые в последние годы, информация о текущем состоянии разработки эксплуатируемых пластов обычно остается неполной, что затрудняет создание и постоянное обновление многомерных детерминированных моделей фильтрации продуктивных пластов. Поэтому при прогнозировании эффективности проведения мероприятий по увеличению нефтегазоотдачи на практике специалисты добывающих предприятий пользуются в основном

специально разработанными кривыми вытеснения, а также корреляционным анализом.

Таким образом, проблемы планирования геолого-технических мероприятий (ГТМ) по увеличению производительности скважин нефтегазодобывающих предприятий, являются достаточно сложными и многоаспектными, особенно на поздней стадии разработки месторождений.

Как показывает опыт, в практических задачах не встречаются случайные величины, распределения которых точно соответствовали бы теоретическим распределениям. Последние являются математическими моделями реальных распределений. Подбор таких моделей и анализ их адекватности моделируемым случайным величинам, является одной из основных задач математической статистики, которая, в свою очередь, сводится к проверке предположений (гипотез) о виде модели распределения и о его параметрах.

Из-за наличия неучтенных факторов и неоднозначного действия учтенных, функция зависимости прироста добычи нефти является функцией лишь в статистическом смысле:



**Третья стадия** (участок III) характеризуется падением добычи углеводородов и значительным ростом обводненности продукции скважин.

**На четвертой стадии** (участок IV) наблюдаются сравнительно медленное, постепенное падение добычи углеводородов, дальнейший рост обводненности продукции скважин, вывод скважин из эксплуатационного фонда по причине их обводненности. В итоге четвертая стадия завершается полным прекращением добычи углеводородов и ликвидацией всей промысловой инфраструктуры на месторождении. Четвертую стадию называют **поздней** или **завершающей стадией разработки**.

Следует особо отметить, что развитие широкого спектра методов повышения нефтегазоотдачи пластов, применение эффективного воздействия на продуктивные отложения позволяет на III и IV стадиях разработки месторождений стабилизировать добычу углеводородов, или даже добиться увеличения добычи, увеличить коэффициент извлечения углеводородов из пласта, продлить период эксплуатации месторождения. Использование того или иного метода воздействия на пласт должно предварительно апробироваться на моделях, в т.ч. и математических с целью прогноза фактически получаемых параметров на скважинах.

Количественное прогнозирование основано на переносе прошлых данных на будущее, то есть на предположении, что условия, породившие полученные ранее данные, мало отличаются от будущих условий. Исключение составляют те факторы, которые точно распознаны моделью прогнозирования, что в нефтегазодобыче встречается относительно редко. Можно выделить следующие

этапы построения модели прогнозирования [1]:

Остановимся подробнее на важнейшем этапе – построение и оценка прогнозной модели.

Вначале исследуется модель, которая включает все возможные, поддающиеся изучению факторы влияющих на цель исследования. Затем, проводится упрощение начальной модели, которая по принципу "простоты" будет являться "наилучшей" (практичной) интерпретацией цели исследования. Простые модели легче тестировать во время кросс-проверки и повторного использования. Кроме того, простые модели намного легче использовать в будущем с точки зрения стоимости получения отклика и значений предикторов.

Прогнозирование результатов проведения того или иного вида ГТМ разрабатываемых месторождений нефти и газа с высокой достоверностью возможно при решении ряда задач, основными из которых являются следующие.

1. Определение наиболее значимых факторов, влияющих на прирост уровня добычи нефти и газа при проведении рассматриваемого ГТМ на данном объекте разработки.

2. Определение величины изменения производительности скважины (определение эффективности) в результате проведения ГТМ.

3. Определение вида функции изменения производительности скважины и накопленной добычи углеводородов как функции от времени (соответственно и определение времени действия положительного эффекта от проведения ГТМ).

Для решения первых двух из поставленных задач могут служить такие математические методы и модели как вероятностные и статистические методы, имитационное моделирование и др.

Таблица 1

**Основные этапы построения модели прогнозирования.**

| № этапа | Описание                                                                                                                                                                                                                        | Примечание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I       | Сбор исходных данных и их проверка.<br>Определение набора возможных независимых переменных, содержащих новую информацию о зависимой переменной.<br>Выявление переменных, которые могут оказаться неадекватными данному прогнозу | Независимая переменная исключается из рассмотрения, если она не имеет существенного значения для решения поставленной задачи или характеризуется значительными ошибками измерения.<br>Проводится проверка на мультиколлинеарность - дубляж других независимых переменных. Если между независимыми факторами (предикторами) существует высокая корреляция (линейный коэффициент корреляции свыше 0,7-0,8), то нельзя определить их изолированное влияние на результирующий (прогнозируемый) показатель. Следует учесть, что данный подход не учитывает возможность ложной корреляции. |
| II      | Редукция или уплотнение исходных данных.                                                                                                                                                                                        | Этап необходим в связи с тем, что может быть собрано как избыточное так и недостаточное число исходных данных.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| III     | Построение и оценка прогнозной модели.                                                                                                                                                                                          | Данный этап заключается в подборе модели прогноза, соответствующей особенностям собранных исходных данных с точки зрения минимизации ошибок прогноза. При этом, в процессе выбора прогнозной модели необходимо использовать методы качественной оценки.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| IV      | Экстраполяция модели.                                                                                                                                                                                                           | Модель проходит тестирование на уже имеющихся данных, то есть применяется апробация модели - прогнозирование на сравнительно недавно полученных данных, для которых результаты уже известны, что позволяет проанализировать наблюдаемые ошибки.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Для определения наиболее значимых факторов, влияющих на прирост уровня добычи, вначале отбираются факторы на основе данных теоретического исследования. Далее отобранные факторы подвергаются проверке существенности их влияния на изучаемый показатель, как правило, такая проверка включает анализ матрицы парных корреляций, частных корреляций, проверку существенности (значимости) коэффициентов регрессии на основе t-критерия, анализ остатков (отклонений) и т. д. Особенностью множественной регрессии и корреляции является необходимость различать случаи корреляционной множественной связи, когда переменные  $x_1, x_2 \dots x_n$  являются случайными величинами; регрессионной, если переменные  $x_1, x_2 \dots x_n$  - неслучайны-

ми величинами, а также смешанный случай, когда некоторые из переменных - случайные величины, другие - неслучайные. В случае корреляционной зависимости следует вычислять и интерпретировать коэффициенты корреляции, при регрессионной зависимости это не имеет смысла, а при наличии как случайных, так и неслучайных переменных коэффициенты корреляции следует вычислять только между случайными переменными [2]. Поскольку при прогнозировании эффективности ГТМ в модель включаются как случайные (пористость продуктивных пластов, коэффициент глинистости, вязкость пластовой нефти и др.), так и неслучайные величины (расход реагентов на 1 м перфорации, давление закачки и др., определяемые в зависимости от проводимо-

го ГТМ), необходимо проводить проверку значимости факторов с использованием различных инструментов, учитывающих «смешанный» характер набора факторов.

Задачу определения основных показателей эффективности ГТМ (увеличения производительности скважины, времени действия положительно-го эффекта, накопленной добычи углеводородов) целесообразно решать с помощью такого инструмента выявления и анализа связи между несколькими переменными как множественная регрессия. Множественная регрессия представляет собой регрессию результативного признака с двумя или большим числом независимых переменных вида  $y = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ . Вид уравнения множественной регрессии может быть как линейный, так и нелинейными, в зависимости от первоначальных условий. К основным видам нелинейной регрессии относятся:

а) **Полиномиальная регрессия**, содержащая «главные эффекты» (эквивалентно тому что, значения различных предикторов независимы и входят в модель в первой степени) и эффекты высшего порядка для непрерывных предикторов (факторов), но не содержит *взаимодействия* эффектов. Например, полиномиальная регрессия второй степени для трех непрерывных предикторов  $p$ ,  $q$  и  $r$  будет включать главные эффекты для  $p$ ,  $q$  и  $r$  и их квадратичные (то есть, второго порядка) эффекты, но эта модель не будет содержать 2-факторные эффекты или 3-факторное взаимодействие  $p$  на  $q$  и на  $r$ :

$$y = b_0 + b_1p + b_2p^2 + b_3q + b_4q^2 + b_5r + b_6r^2$$

б) **Факторная регрессия**. Для упрощения факторную регрессию определяют как функции, в которых присутствуют все возможные произведения непрерывных предикторов.

Например, полная факторная регрессия для двух непрерывных предикторов  $p$  и  $q$  будет включать главные эффекты (то есть эффекты первого порядка) для  $p$  и  $q$ , а также 2-факторное взаимодействие  $p$  по  $q$ , которое представлено произведением значений  $p$  и  $q$ :

$$y = b_0 + b_1p + b_2q + b_3p \cdot q$$

в) **Регрессии квадратичной поверхности отклика** - это смешанный тип регрессии со свойствами функций *полиномиальной регрессии* и *факторных регрессионных функций*. Регрессии квадратичной поверхности отклика содержат все эффекты из функций полиномиальной регрессии вплоть до 2 степени, а также 2-факторные *взаимодействия* предикторов. Уравнение регрессии с 3 непрерывными предикторами  $p$ ,  $q$  и  $r$ :

$$y = b_0 + b_1p + b_2p^2 + b_3q + b_4q^2 + b_5r + b_6r^2 + b_7p \cdot q + b_8p \cdot r + b_9q \cdot r$$

г) **Регрессионные модели с точками разрыва** (кусочно-линейная регрессия). Данный вид модели следует использовать в тех случаях, когда вид зависимости между предикторами и переменной различается в разных областях значений независимых переменных. Общий вид функции кусочно-линейной регрессии имеет вид:

$$y = (b_{01} + b_{11} \cdot x_1 + \dots + b_{m1} \cdot x_m) \cdot (y \leq b_n) + (b_{02} + b_{12} \cdot x_1 + \dots + b_{m2} \cdot x_m) \cdot (y > b_n)$$

Такие функции нелинейной регрессии как степенная, показательная, экспоненциальная, логарифмическая удобно применять в тех случаях, когда количество предикторов (факторов) мало, в противном случае, обработка с использованием данных функций окажется громоздкой [3].

После составления модели множественной регрессии, проводится оценка регрессионных параметров. В множественной регрессии оценивание параметров регрессии проис-

ходит подбором коэффициентов, минимизирующих дисперсию остатков (сумму квадратов остатков). Любые отклонения наблюдаемых величин от предсказанных означают некоторые потери в точности модели, например, из-за случайного шума (ошибок). Поэтому цель метода наименьших квадратов (на котором в большинстве случаев основывается построение регрессионных моделей) заключается в минимизации *функции потерь*. При достижении этой функцией минимума, получаем оптимальные оценки для параметров (свободного члена, коэффициентов регрессии), т.е. оценки по методу наименьших квадратов [3].

Следует также обратить особое внимание на так называемые выбросы (т.е. экстремальные наблюдения). Выбросы могут вызвать серьезное смещение оценок, "сдвигая" линию регрессии в определенном направлении и тем самым, вызывая смещение регрессионных коэффициентов. Часто исключение всего одного экстремального наблюдения приводит к совершенно другому результату. Важно различать действительные ошибки (настоящие выбросы) и корректные, но резко отличающиеся наблюдения.

В нефтегазодобывающей промышленности приходится иметь дело с трудно прогнозируемыми параметрами и отличить действительные ошибки от корректных значений часто бывает очень сложно. Можно просто исключить то или иное наблюдение из выборки и анализировать оставшиеся более согласованные между собой данные. Но, к сожалению, часто трудно найти убедительное подтверждение тому, что выбросы не соответствуют изучаемому процессу. Например, это касается дополнительного прироста добычи углеводородов

после проведения какого-либо ГТМ. Исключив какое-либо экстремальное значение этого прироста, можно потерять очень важное для прогнозирования значение. В области нефтедобычи на вопросы учитывать или нет то или иное наблюдение, как правило, не бывает однозначных ответов. При этом необходимо учитывать достаточно большой процент неудачных (безуспешных) воздействий на продуктивные пласты, так называемых бросовых работ, среди которых, конечно, наблюдаются явные технологические, а иногда и геологические браки.

После оценивания регрессионных параметров необходимо провести оценку прогнозной модели в целом. Рассмотрим некоторые методы проверки пригодности модели:

**Объясненная доля дисперсии** – отношение полной дисперсии зависимой переменной к доле дисперсии, приходящейся на остатки. Данное значение служит индикатором степени подгонки модели к исходным данным.

**Метод максимального правдоподобия (хи-квадрат)**. Вычисление основано на методе максимального правдоподобия, т.е. максимизации функции правдоподобия. На практике статистика максимального правдоподобия хи-квадрат очень близка по величине к обычной статистике Пирсона хи-квадрат.

Также полезным бывает использование **диаграммы рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений**. Если модель хорошо соответствует данным, можно ожидать, что точки расположатся вдоль прямой линии.

Кроме того для сравнения двух выборок, в нашем случае фактических данных и данных, полученных с

помощью модели, используют ***t*-критерий** (*t*-критерий является наиболее часто используемым методом обнаружения различия между средними двух выборок). *t*-критерий может применяться, если переменные нормально распределены (внутри выборки), а дисперсии наблюдений в выборках не слишком различны. Если условия применимости *t*-критерия не выполнены, следует использовать непараметрические альтернативы *t*-критерия: критерий серий Вальда-Вольфовица, *U* критерий Манна-Уитни и критерий Колмогорова-Смирнова и другие [4].

Проблемы прогнозирования технологических результатов проводимых геолого-технологических мероприятий на сегодняшний день для нефтегазодобывающих предприятий, разрабатывающих нефтяные месторождения на поздней стадии их эксплуатации, являются достаточно сложными и многоаспектными. Для решения данных проблем и совершенствования инструментов прогнозирования с целью последующей оптимизации технологических показателей рекомендуется использование корреляционно-регрессионных зависимостей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиуллин Ф.Р., Карпов В.Г., Котов Д.В. Вопросы совершенствования методов прогнозирования эффективности мероприятий по увеличению нефтеотдачи пластов // Проблемы экономики и управления. – 2004. - № 3. – С. 24-28.

2. Красс М.С., Чулпынов Б.П. Математика для экономистов. – СПб: Питер, 2005. С. 464.

3. STATISTICA (Версия 6.1), Электронное руководство.

4. Справочник по математическим методам в геологии. – М.: Недра, 1987. С. 335. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Бекетов С.Б. – доктор технических наук, профессор СевКавГТУ, КубГТУ (г. Краснодар), почетный работник науки и техники РФ. [bsb.gt@rambler.ru](mailto:bsb.gt@rambler.ru)  
Акелян Н.С. – инженер 1-й категории ООО «НК «Роснефть»-НТЦ».



#### ДИССЕРТАЦИИ

##### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

| Автор                                                         | Название работы                                                                                                | Специальность | Ученая степень |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|
| <b>КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</b> |                                                                                                                |               |                |
| ИСАБЕКОВ<br>Ерен<br>Туякович                                  | Технологические схемы ведения очистных и подготовительных работ при разработке выбросоопасных угольных пластов | 25.00.22      | к. т. н.       |