

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Сергей Викторович СОКОЛОВ¹

УДК 622.276.43

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХАРАКТЕРИСТИК ВЫТЭСНЕНИЯ

¹ кандидат технических наук,
старший эксперт ООО «ТННЦ»
svsokolov2@rosneft.ru

Аннотация

В развитие идей по прогнозированию профилей добычи нефти с учетом неопределенностей рассматриваются теоретические и практические аспекты реализации вероятностной модели для залежей, находящихся на зрелой стадии разработки. В основу предложенной модели положен метод характеристик вытеснения, который хорошо зарекомендовал себя в практике проектирования, анализа и моделирования разработки нефтяных месторождений. На фактических показателях эксплуатации реального месторождения продемонстрирована работоспособность предложенной вероятностной модели.

Цитирование: Соколов С. В. Математическая модель прогнозирования базовой добычи нефти с учетом неопределенностей на основе метода характеристик вытеснения / С. В. Соколов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 1. С. 82-91.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91

Ключевые слова

Математическая модель, характеристики вытеснения, профиль добычи нефти, учет неопределенностей.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91

Введение

В практике проектирования, анализа и моделирования разработки для решения таких задач, как оценка извлекаемых запасов нефти, расчет эффекта от реализации геолого-технических мероприятий и прогноз технологических показателей на перспективу широко применяются характеристики вытеснения [1]. Это обусловлено относительной простотой их применения, когда в качестве исходных данных используется только динамика технологических показателей и не требуется информация о геологических и фильтрационных свойствах объектов.

Вместе с тем метод характеристик имеет ряд недостатков, которые существенно ограничивают область его применения и достоверность результатов расчетов. Большинство предлагаемых формул начинают «работать» при высокой обводненности продукции. Отсутствует общепринятая методика выбора вида характеристики и глубины интервала аппроксимации. В идеальном варианте реализуемая система разработки на интервале аппроксимации должна быть неизменной, но на практике это требование не выполняется почти никогда.

Применение метода характеристик предполагает на первом шаге решение задачи аппроксимации, а на втором — экстраполяции. При этом незначительные изменения в исходных данных могут привести к существенной вариации оценок искомых параметров (коэффициентов характеристики). Например, отключение на залежи высокообводненной скважины, скорее всего, приведет к росту потенциально извлекаемых запасов нефти, хотя, по сути, должно привести к снижению оценки данной величины.

С формальной точки зрения метод характеристик аналогичен задаче интерпретации фильтрационных параметров пласта по кривым восстановления давления. Задачи такого типа принято называть некорректно поставленными. Для успешного их решения необходимо использование помехоустойчивых алгоритмов. В основе таких алгоритмов лежит применение так называемых стабилизаторов, неких формализованных априорных представлений, позволяющих получить единственное решение задачи.

Большая часть характеристик вытеснения (Г. С. Камбарова, С. Н. Назарова, Н. В. Сипачева, А. М. Пирведяна, Д. К. Гайсина и др.) являются асимптотическими, т. е. при увеличении добычи жидкости накопленная добыча нефти стремится к потенциально извлекаемым запасам, которые входят в формулу в виде некоторого коэффициента, или их комбинации. Оценка величины извлекаемых запасов нефти возможна и другими методами, например, статистическими или методом коэффициентов [2].

При заданной величине извлекаемых запасов формулы для двухпараметрических характеристик вытеснения могут быть полностью определены из усло-

вия прохождения прямой через последнюю фактическую точку в заданных переменных. Это позволит, с одной стороны, сгладить переход от фактической динамики к прогнозным показателям добычи, но с другой стороны, возможно, изменит тенденцию роста обводненности вследствие изменения угла наклона расчетной прямой.

В связи с этим обстоятельством более интересным и продуктивным в данном подходе представляется использование трехпараметрических характеристик вытеснения. В этом случае помимо фактической накопленной добычи флюидов (точка характеристики) появляется возможность воспроизвести и значение производной (текущая обводненность, или аналогичные показатели) при переходе к прогнозным расчетам, обеспечивая плавный переход не только по значениям, но и по тенденции изменения.

В настоящее время для планирования разработки месторождений интенсивно развивается такое направление, как прогнозирование технологических показателей с учетом неопределенностей [4]. Прямое использование для решения этой задачи полномасштабных гидродинамических моделей достаточно сложно в технической реализации и требует огромных вычислительных ресурсов. Разработанная модель прогнозирования показателей добычи с учетом неопределенностей основывается на использовании аналитического подхода (метода характеристик). Это дает возможность для выполнения экономических расчетов и при этом, как это показано, обладает приемлемой точностью вычисления технологических показателей.

Математическая модель

Рассмотрим трехпараметрические характеристики вытеснения, связанные с именами В. В. Стасенкова (1) и В. М. Ревенко (2):

$$Q_n = A - B \exp(C \cdot Q_j), \quad (1)$$

$$Q_n = A - B (Q_j)^C. \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения: Q_n , Q_j — накопленная добыча нефти, жидкости. A , B и C — коэффициенты характеристик. При ($C < 0$) коэффициент A является асимптотой характеристики и имеет физический смысл потенциально извлекаемых запасов нефти. Суть разработанной модели заключается в двух аспектах. Первый аспект касается модификации характеристик (1-2), второй — в использовании модифицированных характеристик для вероятностной оценки профилей добычи. Рассмотрим последовательно эти аспекты.

Приведем указанные формулы к безразмерному виду путем следующей замены переменных: $Z = Q_n / A$, $U = Q_j / A$. В данном случае переменная Z интерпретируется как отбор от извлекаемых запасов, а U — как коэффициент прокачки. Формулы (1) и (2) примут следующий вид:

$$Z = 1 - D \exp(-N U), \quad (3)$$

$$Z = 1 - D (U)^{-N}. \quad (4)$$

Допустим, что текущее состояние разработки объекта характеризуется отбором от извлекаемых запасов (Z_0), коэффициентом прокачки (U_0) и обводненностью (B_0). Тогда коэффициенты характеристики (3) могут быть определены по следующим формулам:

$$N = (1 - B_0) / (1 - Z_0),$$
$$D = (1 - Z_0) / \exp(-N U_0).$$

Для характеристики (4) соответствующие формулы имеют вид

$$N = (1 - B_0) U_0 / (1 - Z_0),$$
$$D = (1 - Z_0) / (U_0)^{(-N)}.$$

Частные случаи представленных характеристик давно и успешно применяются в практике проектирования и анализа разработки, международном аудите запасов. Так, формула (1) является обобщением экспоненциального закона падения дебита (Дж. Арпс, В. Д. Лысенко). Формула (2) при различных значениях показателя степени C переходит в известные характеристики (Г. С. Камбаров, А. М. Пирведян).

В основу предлагаемого алгоритма расчета вероятных профилей добычи положим следующие соображения. Базовыми параметрами, определяющими профиль добычи, являются извлекаемые запасы и темпы их отбора [3]. Поскольку скважины уже эксплуатируются, то текущие темпы отбора известны. Прогнозные извлекаемые запасы неизвестны, но могут быть оценены с некоторой долей условности, т. е. будем считать, что известно распределение вероятности извлекаемых запасов. Соответственно, профили технологических показателей разработки тоже должны иметь вероятностный характер. Это может быть реализовано путем многократных расчетов (как правило, не менее 30), где каждый прогнозный расчет (итерация) выполняется при новом значении извлекаемых запасов, полученных статистическим испытанием из заданного распределения. В качестве исходных данных необходимо также задать следующие параметры: текущее пластовое давление, средние забойные давления при закачке и отборе, текущий и накопленный отборы нефти и жидкости, закачка воды, коэффициент упругоэластичности пласта, изменение коэффициента продуктивности по мере обводнения.

С учетом сказанного выше возможна реализация следующего алгоритма расчета технологических показателей на каждой из итераций:

1. по величине извлекаемых запасов, накопленному отбору нефти, жидкости и обводненности определяется характеристика вытеснения;
2. по заданным пластовому и забойным давлениям, текущему отбору жидкости и закачке воды определяются текущие коэффициенты продуктивности и приемистости;
3. далее расчет идет по временным шагам; на каждом из них по известному перепаду давлений и коэффициентам продуктивности и приемистости вычисляется прогнозный отбор жидкости и закачка воды;
4. соответствующий отбор нефти и текущая обводненность определяются по характеристике вытеснения;

5. с учетом упругоэластичности пласта на основании материального баланса пересчитывается пластовое давление для следующего временного шага;

6. корректируются коэффициенты продуктивности и приемистости, если такие функции определены, и производится переход на следующий временной шаг.

По завершению итераций формируются профили добычи, закачки и пластового давления для заданных квантилей (как правило, P10, P50, P90).

Разработанная модель напрямую не учитывает прогнозирование выбытия скважин из действующего фонда. В этой связи необходимо задание какого-то дополнительного алгоритма, который должен учитывать тот факт, что нередко отдельные скважины весьма существенно различаются по дебитам и обводненности. Очевидно, что в этих условиях прогноз по залежи в целом будет более оптимистичным, нежели суммарная динамика прогнозных показателей по отдельным скважинам. Выполнение прогнозных расчетов по каждой скважине в отдельности при условии задания соответствующего распределения извлекаемых запасов позволит прогнозировать выбытие скважин из действующего добывающего фонда просто путем задания условия по критической обводненности или дебиту нефти. Нагнетательные скважины могут выбывать по сохранению соотношения с добывающими, или по критичной приемистости.

Пример расчета

Прежде чем переходить к примеру расчета с учетом неопределенностей, сделаем оценку того, на какой стадии разработки месторождений возможно применение трехпараметрических характеристик вытеснения. Отметим, что такой вопрос всегда имеет место при использовании метода характеристик. Для ответа на него по результатам эксплуатации крупной нефтяной залежи (меловые отложения Нижневартовского свода) была построена характеристика вытеснения (4), начиная с обводненности продукции 30% (рис. 1, 2). Коэффициент корреляции между фактическими и расчетными показателями по годовой добыче нефти составил 0,998, параметры характеристики — $A = 1\,050$, $D = 0,309$, $N = 0,906$; все это свидетельствует о возможности применения разработанных характеристик вытеснения и при средних значениях обводненности.

Теперь рассмотрим залежь, разрабатываемую системой добывающих (30 ед.) и нагнетательных (13 ед.) скважин. На данный момент отобрано 4 804 тыс. т нефти и 5 055 тыс. т жидкости, текущая обводненность — 10%. Принято, что остаточные извлекаемые запасы по скважинам подчиняются нормальному распределению (среднее значение 200 тыс. т, среднеквадратичное отклонение 60 тыс. т). Дебиты жидкости по скважинам изменяются от 10 до 233 т/сут. Количество выполненных итераций равно 50.

Вероятностная динамика накопленной добычи нефти представлена на рис. 3. По квантилям вероятности на тридцатый год прогноза она соответственно выглядела так: P90 — 9 784 тыс. т, P50 — 10 218 тыс. т, P10 — 10 625 тыс. т.

На основе аналогичной характеристики вытеснения с использованием разработанной модели выполнен прогноз динамики добычи в целом по залежи. Сопоставление рассчитанной таким образом динамики накопленной добычи

нефти с динамикой, соответствующей квантилю P50 показывает, что расчет в целом по залежи оказывается существенно более оптимистичным, нежели расчет с суммированием добычи по скважинам (рис. 4).

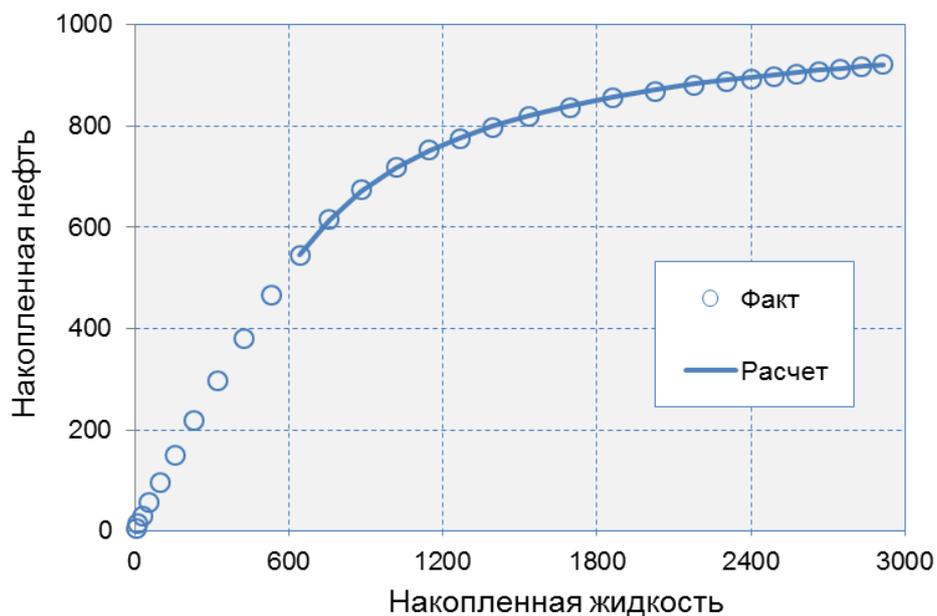


Рис. 1 Характеристика вытеснения

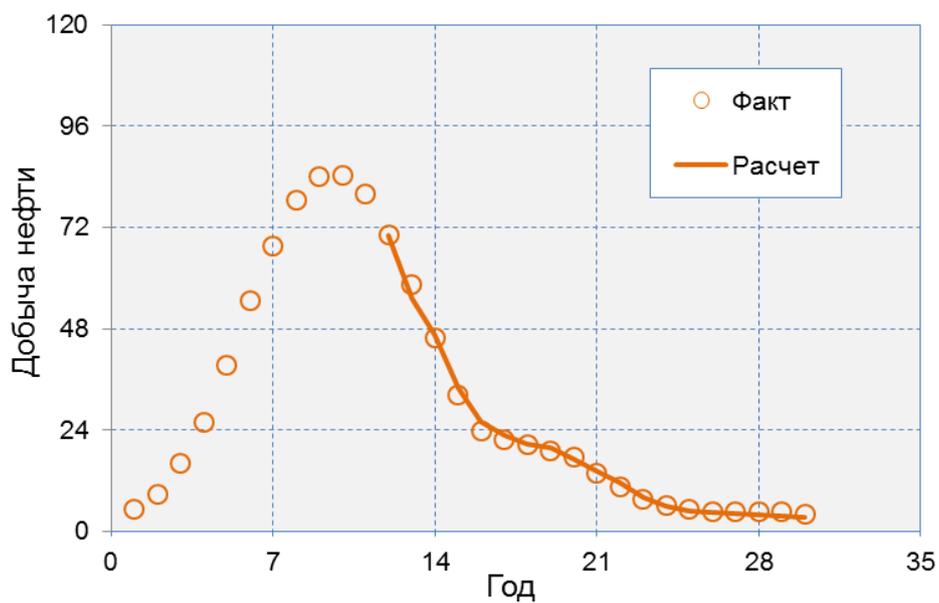


Рис. 2 Воспроизведение добычи нефти

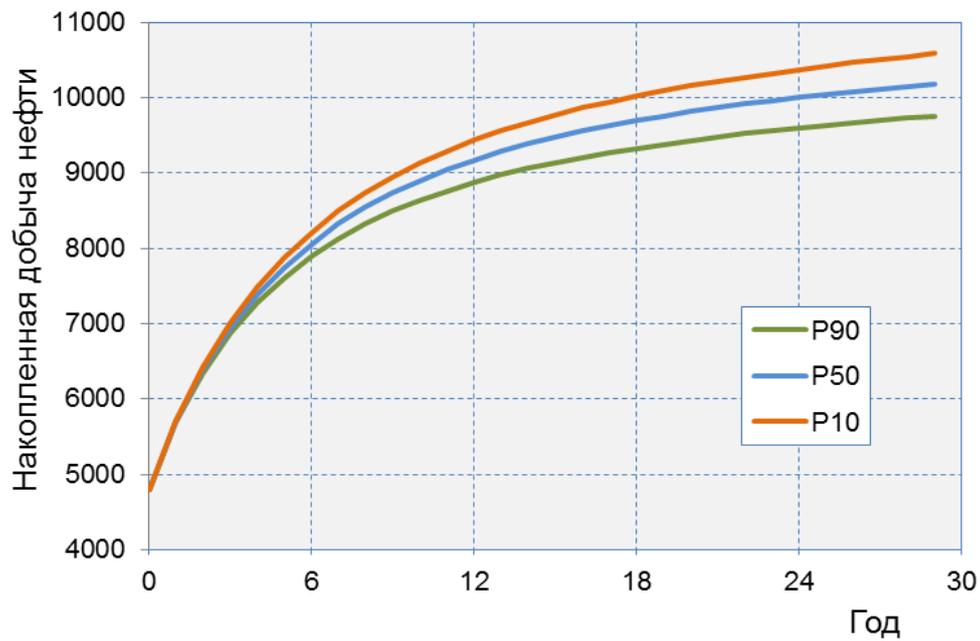


Рис. 3 Вероятностная динамика добычи нефти

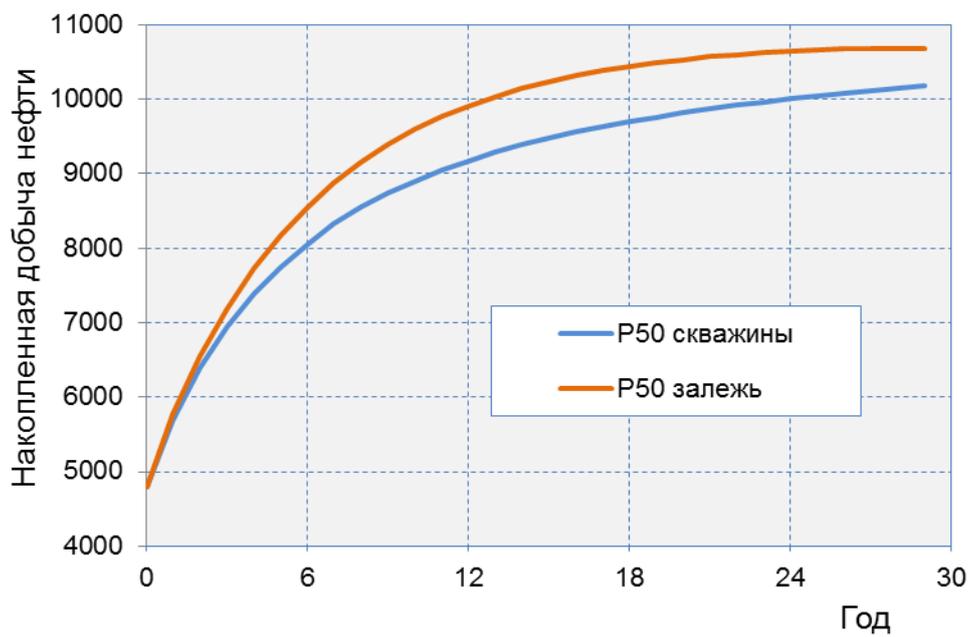


Рис. 4 Сопоставление вариантов прогноза

Выводы

В статье была продемонстрирована работоспособность разработанной математической модели, реализованной в виде компьютерной программы и позволяющей рассчитывать базовый вариант вероятностных профилей добычи по залежам, находящимся в эксплуатации. С применением данной модели показано, что прогноз в целом по залежи, на базе одной и той же характеристики вытеснения, существенно более оптимистичен, нежели сумма прогнозов по отдельным скважинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по геолого-промысловому анализу разработки нефтяных и газонефтяных месторождений: РД 153-39.0-110-01. М.: ВНИИОЭНГ, 2002. 120 с.
2. Методическое руководство по расчету коэффициентов извлечения нефти из недр: РД 39-0147035-214-86. М.: Министерство нефтяной промышленности, 1986. 253 с.
3. Соколов С. В. Анализ неопределенностей профилей добычи (в порядке обсуждения) / С. В. Соколов // Наука и ТЭК. Июнь 2012. №6. С. 8-10.
4. Степанов А. В. Анализ неопределенностей на примере адаптации модели реального месторождения / А. В. Степанов, А. Ю. Сурков, М. А. Басыров, А. С. Кундин // Нефтепромысловое дело. 2013. № 2. С. 8-12.

Sergey V. SOKOLOV¹

**MATHEMATICAL PREDICTION MODEL
FOR BASE OIL PRODUCTION
WITH ACCOUNT OF UNCERTAINTIES
BASED ON THE METHOD
OF DISPLACEMENT CHARACTERISTICS**

¹ Cand. Sci. (Engin.), Senior Expert,
Tyumen Petroleum Research Center
svsokolov2@rosneft.ru

Abstract

Following the development of ideas on predicting oil production profiles with the account of uncertainties, the current paper discusses theoretical and practical aspects of the implementation of a probabilistic model for the deposits in a peak development stage. The suggested model is based on the method of displacement characteristics, which proved its worth in designing, analysis, and simulation of oil field development. The working efficiency of the suggested probabilistic model is demonstrated on the development parameters of an actual field.

Keywords

Mathematical model, displacement characteristics, oil production profile, accounting for uncertainties.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91

REFERENCES

1. Ministry of Oil Industry. 1986. Metodicheskoe rukovodstvo po raschetu koeffitsientov izvlecheniya nefi iz nedr: RD 39-0147035-214-86 [Methodological Guideline on Estimating Oil Recovery Efficiency: RD 39-0147035-214-86]. Moscow: Ministry of Oil Industry.

Citation: Sokolov S. 2016. “Mathematical Prediction Model for Base Oil Production with Account of Uncertainties Based on the Method of Displacement Characteristics.” Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 1, pp. 82-91.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-82-91

2. Sokolov S. V. 2012. Analiz neopredelennosti profilei dobychi (v poryadke obsuzhdeniya) [Uncertainty analysis of production profiles (discussing priorities)]. Science and FEC, June, no 6, pp. 8-10.
3. Stepanov A. V., Surkov A. Yu., Basyrov M. A., Kundin A. S. 2013. “Analiz neopredelennosti na primere adaptatsii modeli realnogo mestorozhdeniya” [Uncertainties Analysis with the Example of Real Field Model Adaptation]. Neftepromyslovoe delo, no 2, pp. 8-12.
4. VNIIOENG. 2002. Metodicheskie ukazaniya po geologo-promyslovomu analizu razrabotki neftyanykh i gazoneftyanykh mestorozhdenii: RD 153-39.0-110-01 [Recommended Practices on Geologic-Production Analysis of Oil and Oil-And-Gas Fields Development: RD 153-39.0-110-01]. Moscow: VNIIOENG.