

УДК 519.8

© М. И. Гусев, В. А. Леонов

ОБ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Введение

В докладе рассматриваются задачи выбора технологических режимов нефтедобывающего комплекса с целью повышения эффективности его работы. Первая часть доклада посвящена разработке алгоритмов оптимизации текущей добычи нефти путем управления режимами работы газлифтного нефтедобывающего комплекса. Во второй части рассматривается задача максимального извлечения нефти из пласта за определенный достаточно длительный промежуток времени с учетом ограничений, налагаемых существующими технологиями добычи нефти.

§ 1. Алгоритмы оптимизации работы газлифтного комплекса

Газлифтный способ добычи нефти основан на закачивании в нефтяные скважины газа высокого давления (ВД) с целью повышения дебита скважин. Газлифтный комплекс состоит из нефтяных скважин, объединенных системами распределения газа ВД и нефтесбора. Управление процессом нефтедобычи осуществляется путем перераспределения газа ВД между скважинами. Задача оптимизации работы комплекса может быть представлена в следующем виде [1]

$$f(u) = \sum_{i=1}^n f_i(u_i) \rightarrow \max, \quad \sum_{i=1}^n u_i \leq R, \quad u_i \in U_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Здесь n — количество скважин, u_i — количество газа ВД, закачиваемое в i -ю скважину за единицу времени (сутки), R — суммарный ресурс газа ВД. Множество U_i представимо в виде объединения $k_i \leq 4$ непересекающихся отрезков $U_i = \bigcup_{j=1}^{k_i} [a_j^i, b_j^i]$, $0 \leq a_j^i \leq b_j^i < a_{j+1}^i$, отрезок $[a_1^i, b_1^i]$ может вырождаться в точку. Функция $f_i(u_i)$, $i = 1, \dots, n$, задающая зависимость суточного дебита i -ой скважины от объема закачиваемого газа, строго вогнута и возрастает на каждом из отрезков $[a_j^i, b_j^i]$, кроме того $f_i(b_j^i) \leq f_i(a_{j+1}^i)$, $f_i'(b_j^i) \geq f_i'(a_{j+1}^i)$, где f_i' означает левую или правую производную f_i в зависимости от того, в каком из концов отрезка она вычисляется. График функции f_i называют характеристической кривой газлифтной скважины. Если $a_1^i = b_1^i$, то $f(a_1^i) = 0$, в этом случае выбор $u_i = a_1^i$ означает отключение i -ой скважины. Интервалы (b_j^i, a_{j+1}^i) , попадание в которые не допускается, характеризуют зоны неустойчивой работы газлифтных клапанов.

Рассматриваемая задача относится к классу дискретно-непрерывных задач математического программирования, решать ее приходится для достаточно больших величин $n = 10^2 - 10^3$. Для решения предлагается субоптимальный алгоритм, основанный на замене исходной конечномерной задачи задачей оптимального управления.

Рассмотрим следующую задачу оптимального управления

$$\sum_{i=1}^n x_i(1) \rightarrow \max, \quad \dot{x}_i = f_i(u_i(t)), \quad \dot{x}_{n+i} = u_i(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad x_i(0) = 0, \quad i = 1, \dots, 2n, \quad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n x_{n+i}(1) \leq R, \quad u(t) = (u_1(t), \dots, u_n(t)) \in U = U_1 \times \dots \times U_n, \quad t \in [0, 1]. \quad (3)$$

Область достижимости рассматриваемой управляемой системы в момент $t = 1$ — выпуклый компакт, поэтому последняя задача в отличие от (1) — задача выпуклого программирования.

Пусть $\lambda \geq 0$ — решение двойственной задачи. Потребуем выполнение следующего условия: если для некоторого i максимум $f_i(u_i) - \lambda u_i$, $u_i \in U_i$, достигается в двух или более точках, то для любого $j \neq i$ максимум $f_j(u_j) - \lambda u_j$, $u_j \in U_j$, достигается в единственной точке. Последнее является условием общего положения и, как показывает проверка на реальных данных, практически всегда выполняется. При этом оптимальное управление $u_i(t) \equiv \text{const}$ для всех i , за исключением быть может одного. Заменяя для данного i $u_i(t)$ подходящим образом подобранной константой, мы получаем приближенное решение задачи (1), которое тем точнее, чем больше величина n . Данные соображения положены в основу алгоритма решения задачи. Для величин n порядка 100 – 300 алгоритм дает решение, проигрывающее десятые доли процента решению, получаемому при помощи точных алгоритмов. При этом по скорости работы данный алгоритм быстрее на несколько порядков. В настоящее время алгоритм реализован также для задач с дополнительными технологическими ограничениями и задач оптимизации себестоимости добываемой нефти.

§ 2. Оптимизация технологических режимов работы скважин на основе характеристик вытеснения

Рассматривается задача максимального извлечения нефти из нефтяного пласта за определенный, достаточно длительный, промежуток времени с учетом ограничений, налагаемых существующими технологиями добычи нефти. В основу рассматриваемой в докладе математической модели положена характеристика вытеснения (кривая обводнения), связывающая накопленную добычу нефти (суммарную добычу нефти по данной скважине к заданному моменту времени) с накопленной добычей жидкости. Характеристика вытеснения используется для прогнозирования основных технологических показателей разработки продуктивных пластов нефтяных месторождений и процессов и получается обычно в результате статистической обработки данных [2]. Задача максимизации извлечения нефти формулируется как задача оптимального управления с терминальным критерием, где в качестве управляющих параметров выбирается скорость добычи жидкости, а зависимость добычи нефти от добычи жидкости описывается при помощи экстраполяции построенных характеристик вытеснения. Ограничения на управляющие параметры заданы системой линейных неравенств. В том случае, если в оптимизации участвуют газлифтные скважины, к данным ограничениям добавляется нелинейное ограничение, появление которого обусловлено тем, что данные скважины используют общий ресурс газа высокого давления. Дополнительные ограничения на скорость добычи нефти и воды учитываются при помощи штрафных функций.

В докладе предложены и обоснованы алгоритмы решения рассматриваемой задачи оптимального управления, основанные на необходимых условиях оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина. Алгоритмы реализованы в виде программ на языке MATLAB с использованием некоторых функций пакета MATLAB Optimization Toolbox. Приводятся примеры численных расчетов оптимальных режимов.

Список литературы

1. Gusev M. I., Leonov V. A. Algorithms for control of gas-lift process of oil extraction// Control Applications of Optimization 2000. Proceedings of the 11th IFAC Workshop. IFAC Proceedings Volumes, Elsevier, 2000.
2. Леонов В. А. Способ адаптивной оптимизации пластового давления// Тезисы докладов научно-практической конференции VIII Международной специализированной выставки «Нефть, газ. Нефтехимия, 2001. Новейшие методы увеличения нефтеотдачи пластов — теория и практика их применения». Москва, 2001.

Гусев Михаил Иванович
ИММ УрО РАН,
Россия, Екатеринбург
e-mail: gmi@imm.uran.ru

Леонов Василий Александрович
НИИ Сибгеотех,
Россия, Нижневартовск
e-mail: leon@sgt.ru