

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСВОЕНИЯ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Скиба А.К.<sup>1</sup>, Скиба Н.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Вавилова 40

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,  
Россия, г. Краснодар, ул. Московская 2  
a.k.skiba@mail.ru, n\_skiba@mail.ru

*Аннотация: Строится непрерывная динамическая модель освоения газоконденсатного месторождения. Предполагается использование сайклинг-процесса, для осуществления которого осуществляется закачка сухого газа в пласт. Управлениями динамическим процессом являются прирост добывающих и нагнетательных скважин и доля нагнетательных скважин, задействованных на добычу.*

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение, сайклинг-процесс, стратегия разработки газоконденсатного месторождения, добыча газа, добыча конденсата, динамическая модель разработки газоконденсатного месторождения.

Среди наиболее важных народнохозяйственных проблем является задача комплексного использования ресурсов газоконденсатных месторождений. Газ и газовый конденсат являются ценным сырьём для химической и нефтехимической промышленности. В состав добываемого сырья включены этан, метан, бутаны, бензино-керосиновые фракции углеводородов, дизельные фракции углеводородов, высокомолекулярные жидкие компоненты нефти и углеводороды C5 и выше.

Особенность разработки газоконденсатных месторождений характеризуется наличием специфических (ретроградных) явлений, проявляющихся в процессе эксплуатации залежи [1].

В процессе эксплуатации газоконденсатных месторождений выявлено следующее. Газовый конденсат при начальном высоком давлении и температуры в пласте с начала разработки залежи находится в газообразном состоянии. По мере движения газа по стволу скважины от забоя к устью газовый конденсат начинает оседать, и продукция скважины на поверхности представлена двумя отдельными фазами – газовой и жидкой, которые двигаются в едином потоке. Оседание конденсата может происходить и в пласте при падении давления, связанном с постепенным истощением запасов.

Газовый конденсат представляет собой смесь жидких углеводородов, выделившихся из газовой фазы при снижении пластового давления и температуры. Весовое содержание конденсата в единице объема добываемого жирного газа (потенциальное содержание газового конденсата) в зависимости от пластового давления описывается функцией  $G(p)$ . Численные значения такой функции определяются для каждой конкретной залежи в результате лабораторных экспериментов с пробами газа на установках высокого давления.

Важно отметить то, что функция  $G(p)$  имеет S-образную форму, т.е.  $G(p)$  является выпукловогнутой функцией. Особенность структуры такой функции может оказывать существенное влияние на выбор стратегии дальнейшего развития всей системы в целом [2].

Современные технологии разработки газоконденсатного месторождения, применяемые в отечественной газовой промышленности, основаны обычно на использовании только природной энергии пласта и ничем не отличаются от технологий разработки чисто газовых месторождений. Данная стратегия освоения газоконденсатных месторождений практически не учитывает многокомпонентного состава сырья и приводит к большим безвозвратным потерям жидких углеводородов (газового конденсата).

Существенного снижения потерь газового конденсата можно достичь с помощью сайклинг-процесса, при котором энергия пласта поддерживается за счет закачки в пласт осушенного природного газа.

На практике применяются несколько разновидностей сайклинг-процесса:

- Полный сайклинг-процесс, при котором для поддержки первоначального пластового давления весь добытый и осушенный газ вновь закачивается в пласт;
- Частичный айклинг-процесс. В пласт закачивается только часть добытого и осушенного газа. В этом случае давление падает постепенно, и в пласте происходит незначительное оседание газового конденсата;

- Канадский сайклинг-процесс. Добытый и осушенный газ в летний период времени полностью или частично закачивается в пласт, а зимой в период наибольшего спроса он полностью отбирается.

Схема применения сайклинг-процесса в модели освоения газоконденсатного месторождения изображена на рис. 1.

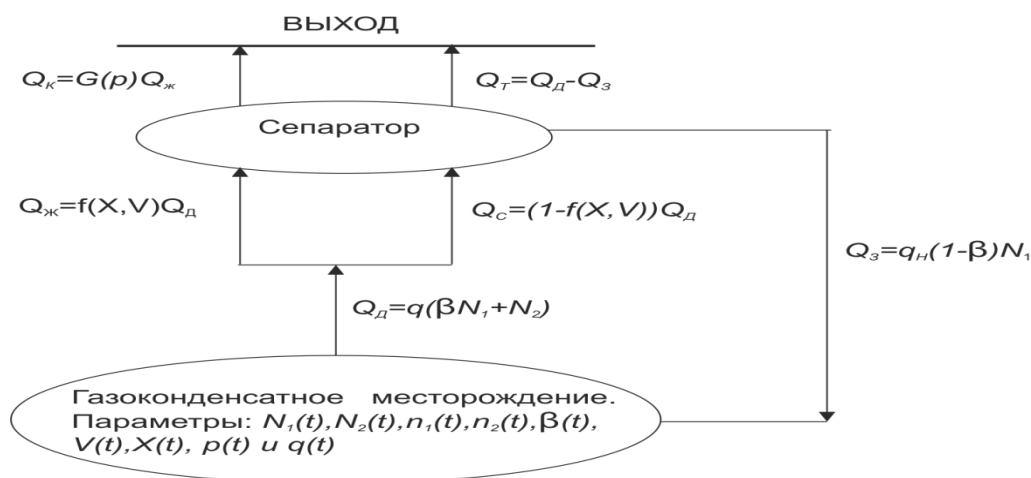


Рис. 1. Схема применения сайклинг-процесса в модели освоения газоконденсатного месторождения

Для построения модели газоконденсатного месторождения введем следующие обозначения:

$N_1, N_2$  - фонд нагнетательных и фонд эксплуатационных скважин;

$n_1, n_2$  - ввод в эксплуатацию нагнетательных и добывающих скважин;

$\beta$  - доля фонда нагнетательных скважин, используемых как добывающие скважины ( $1 \geq \beta \geq 0$ );

$q, q_n$  - дебит добывающих скважин и приемистость нагнетательных скважин (приемистость нагнетательных скважин считаем неизменной величиной);

$Q_ж, Q_т, Q_к$  - добыча жирного газа, товарная добыча газа и добыча газового конденсата;

$Q_д, Q_с, Q_н$  - совокупная добыча жирного и сухого газа, добыча сухого газа и текущий объем закаченного в пласт газа;

$V, X$  - текущий извлекаемый запас газа и текущий запас жирного газа;

$p$  - пластовое давление.

Начальные значения используемых величин помечены верхним индексом «0».

Изменения во времени фондов скважин описываются уравнениями

$$(1) \quad \dot{N}_i = n_i, \quad i = 1, 2.$$

Добыча жирного газа и конденсата рассчитывается по формулам:

$$(2) \quad Q_ж = Q_д f(X, V) = q(N_2 + \beta N_1) f(X, V);$$

$$(3) \quad Q_к = Q_ж G(p).$$

О функции  $G(p)$  сказано выше, а о функции  $f(X, V)$  будет подробно сказано ниже.

Пренебрегая объемом добываемого конденсата по сравнению с объемом газа, имеем

$$(4) \quad Q_т = Q_д - Q_н = q(N_2 + \beta N_1) - q_n(1 - \beta)N_1.$$

Заметим, что если в сайклинг-процессе используется сухой газ только из рассматриваемого месторождения, то  $Q_т \geq 0$ .

Динамика запасов описывается дифференциальными уравнениями:  $\dot{V} = -Q_т$  и  $\dot{X} = -Q_ж$ . При этом очевидно двойное неравенство  $V \geq X \geq 0$ .

Как и в моделях газового и нефтяного месторождений, делается упрощающее предположение о пропорциональности изменения дебитов скважин, пластового давления и извлекаемого запаса газа, т.е.  $q = \frac{q^0}{V^0} V$ ,  $p = \frac{p^0}{V^0} V$ . Откуда динамика запасов газа представится в следующем виде:

$$(5) \quad \dot{q} = -\frac{q^0}{V^0} Q_т,$$

Данное уравнение для случая газового и нефтяного месторождения было впервые предложено А.В. Федосеевым и В.Р. Хачатуровым [3-5] и являлось основой для постановки и решения ряда оптимизационных задач [6,7].

Для завершения построения модели опишем упомянутую выше функцию  $f(X, V)$ . Данная функция определяет долю жирного газа в добываемом газе. Эта функция характеризует процесс вытеснения жирного газа из пласта нагнетаемым сухим газом. В начале разработки  $f(X, V) = 1$ , когда весь газ полностью вытеснен  $f(X, V) = 0$ . Вообще говоря, точный вид функции  $f(X, V)$  до начала разработки неизвестен, Относительно него можно сделать лишь априорные предположения:

происходит поршневое вытеснение жирного газа сухим без смешивания газов и без прорыва сухого газа к забоям скважин, работающих на добычу. После полного извлечения жирного газа сухой газ одновременно поступает во все скважины. В таком случае

происходит мгновенное равномерное смешивание сухого и жирного газов с мгновенным прорывом сухого газа к забоям добывающих скважин. В добываемом газе объемы жирного и сухого газов пропорциональны их текущим запасам в пласте. В этом случае –; третье предположение является комбинацией первых двух с некоторым коэффициентом  $\alpha$  0). Модель построена.

Управляющими параметрами в модели являются  $n_1$  и  $\beta$ . Выбирая динамику управляющих параметров, мы можем генерировать различные виды сайклинг-процессов, вычисляя при этом прибыль, затраты и т. д. В том числе и величины безвозвратных потерь газового конденсата в зависимости от той или иной стратегии разработки газоконденсатного месторождения. Кроме того на основе построенной модели можно поставить различные оптимизационные задачи, позволяющие ориентироваться при выборе стратегий разработки газоконденсатных месторождений как с учетом так и без учета сайклинг-процесса.

## Литература

1. Гриценко А.И., Островская Т.Д., Юшкин В.В. Углеводородные конденсаты месторождений природного газа. - М.: Недра, 1983. -263 с
2. Skiba A. K. Optimal Growth with a Convex-Concave Production Function // *Econometrica*. 1978. Vol. 46. — Pp. 527–539.
3. Хачатуров В.Р., Соломатин А.Н., Зотов А.В. и др. Планирование и проектирование освоения нефтегазодобывающих регионов и месторождений: Математические модели, методы, применение / Под ред. В.Р. Хачатурова. -М.:УРСС:ЛЕНАНД, 2015. -304 с.
4. Крюков В.А., Скиба А.К., Федосеев А.В. Задачи оптимального управления разработкой газоконденсатного месторождения. -М.: ВЦ АН СССР, 1990. -44 с.
5. Федосеев А.В., Хачатуров В.Р. Постановка и исследование задач оптимального управления для анализа перспективных планов в нефтедобывающей промышленности //В сб.: Имитационное моделирование и математические методы анализа перспективных планов развития нефтедобывающей промышленности. -М.: ВЦ АН СССР, 1984. -С. 66-112.
6. Скиба А.К. Принцип максимума в задаче максимизации дохода для модели газового месторождения // Вестник РУДН. Серия "Математика. Информатика. Физика". 2009. Т. 1. - С. 14-22.
7. Скиба А.К. Смешанное ограничение в прикладной задаче оптимального управления // Вестник РУДН. Серия "Математика. Информатика. Физика". 2012. Т. 4. - С. 31-43.