

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕТЕВОГО МЕЖПРОМЫСЛОВОГО КОЛЛЕКТОРА И ГАЗОСБОРНЫХ СЕТЕЙ

Семухин М.В.

Институт Криосферы Земли СО РАН

Рассматривается трехуровневая система газодобычи, которая осуществляет сбор, подготовку и межпромысловый транспорт газа. Основной алгоритм расчета режимов работы сетевого межпромыслового коллектора и газосборных сетей включает модели двух уровней описания: исходное описание в виде системы нелинейных алгебраических уравнений, линеаризованное описание относительно неизвестных расходов и квадратов давлений или упрощенное описание в виде древовидной структуры.

Для крупных газовых месторождений характерны сложные и разветвленные системы сбора и межпромыслового транспорта газа (рис. 1). Отличительными чертами таких систем являются: кустовое расположение скважин, разветвленная система шлейфов от скважин до УКПГ, сложная сетевая структура межпромыслового коллектора (МК), наличие нескольких (k) направлений магистрального транспорта газа (выходов системы) и головных компрессорных станций (ГКС).

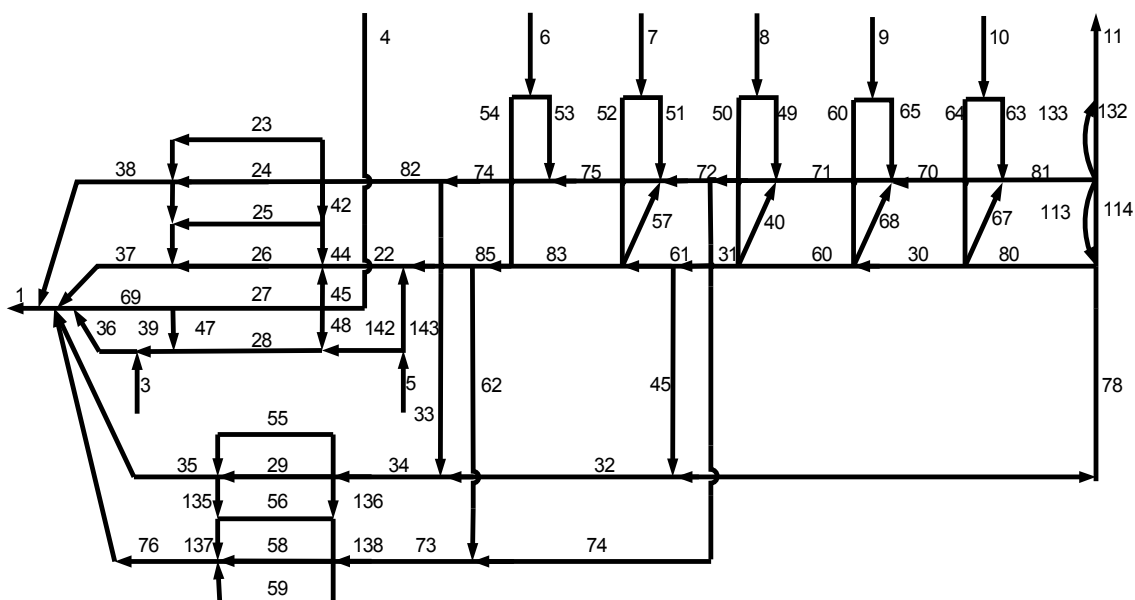


Рисунок 1. Расчетная схема газосборного коллектора сетевой структуры

В реальной жизни мы часто сталкиваемся со сложными системами, имеющими иерархическую структуру. Размерность таких задач, как правило, бывает очень велика, что создает трудности для применения традиционных методов. Решение указанных систем без их преобразования - это очень трудоемкая процедура, которая к тому же даже на современных вычислительных машинах занимает много времени. Это делает практически невозможным решение задач оперативного управления без специальных методов.

В настоящее время только начинает создаваться комплексный подход к принятию решений в сложной многоуровневой иерархической системе газодобычи, которая учитывала бы иерархическую структуру управления, неопределенность измеряемых параметров и коэффициентов моделей, а также требования, накладываемые со стороны процесса разработки месторождения. Промысловая информация характеризуется значительной степенью неопределенности, которая проявляется как в значительной погрешности измерений технологических параметров, так и в отсутствии замеров расходов, давлений и температур во многих узлах газотранспортной сети.

Существует большое количество алгоритмов и программ расчета и оптимизации межпромысловых коллекторов и газосборных сетей от скважин до УКПГ. Основные сложности применения этих моделей для диспетчерских и технологических расчетов связаны с трудностью замера всех необходимых параметров в реальном масштабе времени с требуемой точностью во всех точках моделируемого технологического процесса. Часто при расчетах используются значения теоретических или паспортных коэффициентов моделей или производится итерационная процедура подбора этих коэффициентов диспетчером. Это иногда связано и с отсутствием замеров некоторых параметров, например, расходов газа. Наличие погрешности в замерах и коэффициентах моделей может привести к несовместности решений систем уравнений, а высокая размерность задачи затрудняет процесс поиска причин несовместности.

Все это приводит к низкой точности получаемых результатов расчета и оптимизации, к сложностям при идентификации и повышенным требованиям к профессиональным знаниям пользователя и пониманию им всех тонкостей и ограничений математической модели.

Рассмотрим трехуровневую систему газодобычи которая осуществляет сбор, подготовку и межпромысловый транспорт газа. Добыча газа производится из n скважин, объединенных в m групп по n_j скважин в каждой j -ой группе. Каждая группа скважин подает газ на свою УКПГ через сложную систему шлейфов. После подготовки газ поступает в межпромысловый коллектор (МК) и далее к k головным компрессорным станциям (ГКС) магистральных газопроводов (МГ).

На самом нижнем уровне иерархической системы моделей используются уравнения притока газа к забою и движения его по стволу скважины [1]:

$$P_{\text{пл}i}^2 - P_{\text{заб}i}^2 = A_i q_i + B_i q_i^2 \quad (1)$$

$$P_{\text{заб}i}^2 - P_{\text{yi}}^2 \cdot e^{2S_i} = \theta_{\text{ci}} q_i^2, \quad (2)$$

где $S_i = 0,03415 \frac{\rho L_i}{T_{\text{ср}i} Z_{\text{ср}i}};$

$P_{\text{пл}i}, P_{\text{заб}i}, P_{\text{yi}}$ - пластовое, забойное и устьевое давления i -ой скважины;

A_i, B_i - коэффициенты фильтрационных сопротивлений;

θ_{ci} - коэффициент сопротивления при движении газа по стволу скважины;

ρ - относительная плотность газа по воздуху;

L_i - глубина скважины;

$T_{\text{ср}i}$ - средняя абсолютная температура газа в стволе скважины;

$Z_{\text{ср}i}$ - средний коэффициент сверхсжимаемости газа.

На втором уровне в качестве модели используются уравнения движения газа в шлейфах и регулирующих штуцерах:

$$P_{\text{yi}}^2 - P_{\text{ш}i}^2 = \theta_{\text{ш}i} q_i^2 \quad (3)$$

$$P_{\text{ш}i}^2 - P_{\text{вх}j}^2 = \theta_{\text{r}i} q_i^2; \quad (4)$$

$$P_{\text{вых}j} = P_{\text{вх}j} - \Delta P_j, \quad (5)$$

где $P_{\text{ш}i}, P_{\text{вх}j}$ - давление газа в шлейфе после штуцера и на входе j -ой УКПГ;

$\theta_{\text{ш}i}, \theta_{\text{r}i}$ - коэффициенты сопротивления при движении газа через штуцер и в шлейфе;

ΔP_j - потери давления в обвязках и на технологическом оборудовании j-ой УКПГ.

На третьем уровне управления модель представляет собой систему уравнений стационарного движения газа по межпромысловому коллектору [2]

$$P_{nj}^2 - P_{kj}^2 = \Lambda_j q_j |q_j|, j = \overline{1, L} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in \Omega_+} q_i - \sum_{j \in \Omega_-} q_j = q_r, r = \overline{1, N - (m - k)}, \quad (7)$$

$$\text{где } \Lambda_j = \frac{\lambda_j \rho T_{cpj} Z_{cpj} L_j}{(0,326 \cdot 10^{-3} D_j^{2,5})^2} :$$

λ_j - коэффициент гидравлического сопротивления;

L_j - длина линейного участка (ЛУ);

D_j - внутренний диаметр трубы;

Ω_+, Ω_- - множество ребер, входящих в узел г и выходящих из него.

Газосборная сеть задается в виде связного ориентированного графа, имеющего N узлов и L ребер. Эта система уравнений может быть дополнена для некоторых УКПГ ограничением l ($l = \overline{1, J}$), учитывающим зависимость давления на выходе УКПГ от расхода газа

$$P_{nr}^2 \leq A_l q_l |q_l| + B_l q_l + C_l, \quad (8)$$

где A_l, B_l, C_l - коэффициенты аппроксимации. Для более сложных задач используются и зависимости вида $P_{nr} = f(P_{пл}, q_l, n_{скв})$. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость (8) для УКПГ одного из северных месторождений.

Технологические ограничения характеризуются максимальными и минимальными давлениями и расходами на входах в МК и выходах МГ:

$$P_i \in [P_{i\min}, P_{i\max}],$$

$$q_i \in [q_{i\min}, q_{i\max}], i = \overline{1, m + k},$$

определяемые прочностью труб и производительностью ГКС. Кроме того, заданы $(m+k-J)$ граничных условий по давлениям и расходам, и температуры на входах МК.

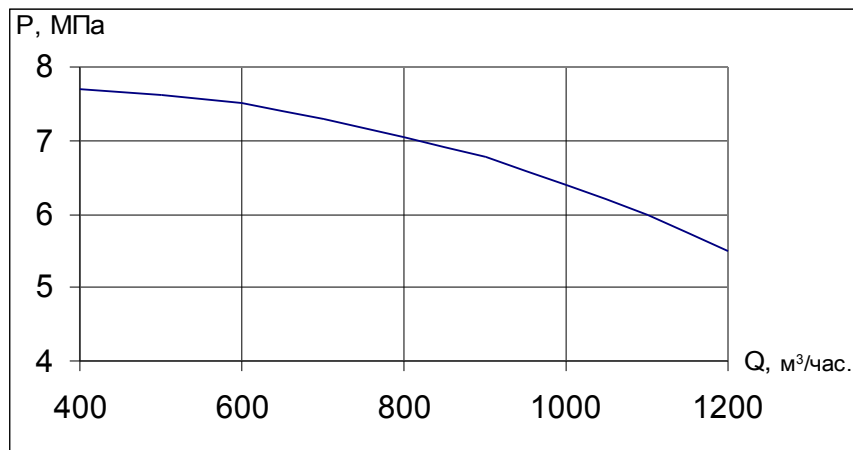


Рисунок 2. График выходного давления УКПП

При вводе новых технологических объектов, изменении нагрузок установок комплексной подготовки газа, плановых заданий по добыче газа и при различных аварийных ситуациях возникает необходимость расчета различных режимов работы межпромыслового коллектора.

Допустим, что граф межпромыслового коллектора имеет N узлов и L ребер. Под узлами (вершинами) графа понимаются начальные и конечные точки линейных участков, все точки разветвления или объединения потоков газа, точки поступления и отбора газа. Под ребром графа понимается линейный участок, соединяющий две вершины графа. Понятие входящих и выходящих ребер определяет ориентацию графа. Поскольку каждое ребро графа характеризуется величиной расхода, а каждая вершина - величиной давления, то общее количество переменных равно $N+L$. Система (6)- (7) имеет $N-(K+M)$ уравнений типа (7) и L уравнений типа (6). Поэтому необходимым условием решения данной системы уравнений является задание $K+M$ переменных.

Особенность рассматриваемого итерационного метода решения состоит в том, что он позволяет производить расчеты для произвольных смешанных $K+M$ переменных. При этом требуется выполнить следующие условия:

- если давление P_j задается в λ узлах, то $\lambda \geq 1$, поскольку в противном случае хотя бы одно из уравнений вида (7) можно представить линейной комбинацией остальных;

- для i -го ребра не должны быть одновременно определены P_H, P_{K_i}, Q_i так как уравнение (7) превращается в верное тождество;

- из тех же соображений нельзя задавать все Q_i, Q_j , входящие в уравнение (7).

Основной алгоритм расчета включает модели двух уровней описания.

1. Исходное описание системой нелинейных алгебраических уравнений.
2. Линеаризованное описание относительно неизвестных расходов и квадратов давлений.

Наиболее часто встречаются различные методы линеаризации, позволяющие свести систему нелинейных уравнений (6) - (7) к системе уравнений, линейных относительно квадратов давлений и расходов [6]:

$$\Lambda_{ij} q_j | q_j | = \frac{1}{2} \Lambda_{ij} q_j^s | q_j^{s-1} + q_j^{s-2} |$$

или

$$\Lambda_{ij} q_j | q_j | = \Lambda_{ij}^{s-1} q_j^s | q_j^{s-1} |, \quad (9)$$

где s - номер итерации.

На основе метода линеаризации (9) система уравнений (6) - (7) сводится к системе линейных уравнений на шаге итерации s относительно неизвестных расходов q_j^s и квадратов давлений $(P_{Hj}^s)^2, (P_{Kj}^s)^2$. Размерность этой системы может быть понижена путем подстановки расходов из уравнений (6) в уравнения (7). Полученная система уравнений решается на основе методов, разработанных для симметричных систем с большим числом нулевых элементов.

Согласование решений происходит как при обычном решении нелинейной системы методами линеаризации – путем пересчета потоков по каждому ребру на каждом шаге итерации и проверки критерия окончания счета.

Алгоритм расчета состоит из следующих этапов [5].

1. Задается $K+M$ переменных.
2. Начальное приближение величин Q_i^0, P_j^0 определяется при решении методом последовательного исключения неизвестных линейной системы, составленной из уравнений вида

$$\sum_{i \in o_r^+} Q_i^0 - \sum_{j \in o_r^-} Q_j^0 = q_r \quad (10)$$

$$P_{Hi}^0 - P_{Ki}^0 = c_i Q_i^0 \quad (11)$$

3. Решается система линейных уравнений относительно неизвестных расходов и квадратов давлений

$$\sum_{i \in \Omega_r^+} Q_i^s - \sum_{j \in \Omega_r^-} Q_j^s = q_r \quad (12)$$

$$P_{Hi}^{s^2} - P_{Ki}^{s^2} = C_i |Q_i^{s-1}| Q_i^s \quad (13)$$

где s - номер итерации.

4. Уточняются значения потоков газа по каждому ребру

$$Q_i^s = \text{sign}(P_{Hi}^s - P_{Ki}^s) \sqrt{\frac{P_{Hi}^{s^2} - P_{Ki}^{s^2}}{C_i}} \quad (14)$$

5. Проверяется критерий окончания счета - обеспечение сбалансированности потоков с заданной точностью ξ

$$\sum_r \left(\sum_{i \in \Omega_r^+} Q_i^s - \sum_{j \in \Omega_r^-} Q_j^s - q_r \right)^2 + \sum_i \left(P_{Hi}^{s^2} - P_{Ki}^{s^2} - C_i |Q_i^{s-1}| Q_i^s \right)^2 \leq \varepsilon \quad (15)$$

Если последнее условие выполняется, то расчет заканчивается. В противном случае необходимо вернуться к этапу 3.

Скорость сходимости алгоритма и время счета, естественно, тем меньше, чем меньше размерность системы. Можно свести систему (12), (13) к системе меньшей размерности, линейной относительно лишь квадратов давлений.

Пусть давление газа задается в λ узлах графа, следовательно, необходимо задать $(K+M)-\lambda$ потоков газа. Все расходы, которые не заданы, находятся из уравнений (13)

$$Q_i^s = \frac{P_{Hi}^{s^2} - P_{Ki}^{s^2}}{C_i |Q_i^{s-1}|} \quad (16)$$

В уравнениях (12) неизвестные величины расхода заменяются значениями правой части равенства (16). Таким образом, получают $N-(K+M)$ линейных уравнений относительно $N-\lambda$ неизвестных квадратов давлений. При добавлении к ним $(K+M)-\lambda$ уравнений линейных участков (13), для которых потоки газа заданы, получают окончательную систему.

В отличие от традиционных методов расчета, в рассмотренном методе расчета стационарного движения газа по сложной сети газопроводов применяется

итерационный метод, основанный на линейризации уравнений (13) по расходам газа с их уточнением по формулам (14), что дает возможность уменьшить количество уравнений исходной системы с увеличением числа задаваемых давлений в узлах графа. Это позволяет значительно сократить время счета с одновременным уменьшением необходимого объема оперативной памяти.

Для расчета неизотермических процессов добавляется еще один итерационный цикл для пересчета температур газа в узлах сети. При наличии на МК ДКС в систему уравнений добавляется уравнение для ДКС и расчет становится аналогичным расчету сетевого МГ [3].

В некоторых реальных случаях система нелинейных алгебраических уравнений (6)-(7) содержит 200-300 и более неизвестных. Это приводит к необходимости решения задач большой размерности и предъявляет определенные требования к быстродействию и объему оперативной памяти.

Другой итерационный метод расчета максимально учитывает специфику реальных структур коллектора. Как правило, в них выделяются такие элементы, как технологические нитки и перемычки. Основная роль в межпромысловом транспорте газа принадлежит технологическим ниткам, в то время как перемычки играют вспомогательную роль. Обычно технологические нитки образуют существенно более простую структуру, приводимую (путем удаления перемычек) к древовидному подграфу.

Итерационная процедура включает в себя расчет дерева - учет перемычек [4]. Таким образом, данный алгоритм также использует два уровня описания:

1. Исходное описание системой нелинейных алгебраических уравнений.
2. Упрощенное описание в виде древовидной структуры (структурное упрощение).

Для расчета дерева нет необходимости использовать общие методы решения систем, а можно воспользоваться приемами типа прогонки. При этом, требования к конфигурации вычислительных средств оказываются минимальными, а число операций линейно зависит от количества узлов дерева. Удаленные ребра исходного графа (перемычки) заменяются граничными

(концевыми) условиями в виде линейной комбинации расхода газа по перемычке и давления в узле.

Предполагается, что исходные концевые условия задаются в таком же виде. Последнее обстоятельство является естественным в реальных задачах: обычно на выходе установки комплексной подготовки газа, подающей газ в коллектор, технологически имеет место зависимость между расходом и давлением газа (рис. 2), которая может быть линеаризована, Условия постоянства расхода или давления также могут рассматриваться как частные случаи линейной зависимости.

После расчета дерева граничные условия пересчитываются из условий обеспечения минимальной невязки для каждой перемычки. Соответствующий алгоритм пересчета обеспечивает сходимость итерационного процесса, в том числе и для процессов транспортировки, описываемых нелинейными соотношениями. Более того, при несущественных изменениях алгоритм может использоваться и для расчета нестационарных процессов.

Некоторое усложнение алгоритма расчета позволяет получать матрицы взаимозависимостей между давлениями и расходами на концах дерева, а значит и сети. Для этого оказывается необходимой соответствующая линеаризация соотношений, описывающих процесс транспортировки газа по линейному участку. Используются могут быть линейная интерполяция и аппроксимация на базисе заданных режимов или разложения в ряды Тейлора. Оптимизационные задачи для критериев максимизации добычи газа и давлений газа на выходах МК могут быть решены на основе метода линейной аппроксимации с применением теории чувствительности.

Аналогичные возможности имеются и для расчета коэффициентов влияния параметров линейных участков (например, их гидравлических сопротивлений) на получаемые решения. Это дает возможность разработки алгоритмов идентификации газосборной сети, что является весьма важным при функционировании системы управления технологическими процессами промысла.

Рассмотренные методы расчета позволяют диспетчерским службам промысла оперативно рассчитывать необходимые технологические показатели и

выбирать оптимальный режим работы межпромыслового коллектора в аварийных ситуациях, при проведении ремонтных работ и планировании развития систем газодобычи.

Анализ численных экспериментов показывает удовлетворительную сходимость итерационного процесса, что позволяет использовать данный метод для моделирования стационарных изотермических и неизотермических процессов межпромыслового транспорта газа, а также для принятия оперативных диспетчерских решений и выбора оптимальных режимов работы межпромыслового коллектора.

Литература

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2002. 352 с.
2. Белоусов В.Д., Блейхер Э.М. и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа. - М: Недра, 1978, 400с. Кучин Б.Л., Алтунин А.Е. Управление системой газоснабжения в осложненных условиях эксплуатации. - М: Недра, 1987, 209с.
3. Семухин М.В. Алгоритм расчета сети материальных потоков, имеющей древовидную подструктуру. Известия ВУЗов "Нефть и газ", вып. 3. - Тюмень, ТюмГНУ, 1998, с.82-85.
4. Семухин М.В., Крел Л.Д. Кутырев А.Л. Алгоритм расчета стационарного режима работы межпромыслового коллектора сетевой структуры. В сб.: "Проблемы нефти и газа Тюмени". Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1984, вып. 61, с.66-68.
5. Kralik J., Stiegler P., Vostry Z., Zavorka J. Modelovani dynamiky rozsahlych siti. Praha, Akademia, 1984, 364p.