УДК 681.5:69:621:039

А.Д. ТЕВЯШЕВ, Д.А. ЗОЛОТАРЕВ

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНОВЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГОРОДСКИХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Рассматривается математическая постановка задачи оптимизации плановых режимов транспорта и распределения природного газа в многоуровневых газораспределительных сетях и метод ее решения. Данная задача относится к классу многокритериальных задач математического программирования с алгоритмически заданной недифференцируемой целевой функцией, алгоритмически заданными недифференцируемыми критериальными ограничениями, нелинейными ограничениями в виде равенств при двусторонней ограниченности переменных. Используются три модифицированных метода: деформируемого многогранника Нелдера-Мида; гидравлического расчета газораспределительных сетей; метод статистической линеаризации системы неявно заданных функций.

1. Введение

В работе [1] была приведена математическая постановка задачи оптимизации плановых режимов транспорта и распределения природного газа в многоуровневых газораспределительных сетях (МГРС) в виде многокритериальной задачи нелинейного стохастического программирования и получен ее детерминированный эквивалент.

В настоящее время не существует общих методов решения задач такого типа. Специфической особенностью этой задачи является ее огромная размерность, особенно для газораспределительных сетей низкого и среднего давления. Это обстоятельство исключает возможность ее непосредственного решения.

Целью данного исследования является разработка эффективного метода решения поставленной задачи, основанного на декомпозиции исходной задачи на k (где k – количество уровней газораспределительной сети) однотипных задач оптимизации, которые решаются последовательно, начиная с нижнего уровня. Координация оптимальных решений между $(k+1)$-м и k-м уровнями осуществляется путем учета условий согласования параметров газовых потоков, определяемых математическими моделями регуляторов давления (ГРП, ПРП) и дополнительными условиями, характеризующими качество функционирования газораспределительной сети в зоне нагрузки соответствующего регулятора давления.

Для достижения поставленной цели решается задача оптимизации режима транспорта и распределения природного газа на каждом из k уровней МГРС. Это осуществляется на основе трех модифицированных методов: деформируемого многогранника Нелдера-Мида, обобщенного на случай решения задач условной оптимизации; гидравлического расчета, обобщенного на случай расчета многоуровневых газораспределительных сетей и алгоритмически заданной нижней границей минимально-допустимого давления на каждом из ее выходов; расчета статистических свойств зависимых переменных математической модели стационарного режима транспорта и распределения природного газа в МГРС в зависимости от статистических свойств независимых переменных на основе модифицированного метода статистической линеаризации системы нелинейных неявно заданных функций.

2. Математическая постановка задачи оптимизации плановых режимов транспорта и распределения газа в МГРС

Детерминированный эквивалент стохастической задачи оптимизации плановых режимов транспорта и распределения природного газа в МГРС на интервале времени $[0,T]$ представляет собой задачу нелинейного математического программирования вида [1]:

$$J_0 = \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{N^k}(\overline{P}_j^k(T) - P_j^{k-}) \to \min_{q\in L^k \in\Omega}; \tag{1}$$

$$\Omega_1: \quad \min_{k=\overline{1,K}} \min_{j\in L^k} \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{m_{q_j^+} + 3\sigma_{q_j^+} - m_{q_j^k}}{\sigma_{q_j^k}}\right) - \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{m_{q_j^-} - 3\sigma_{q_j^-} - m_{q_j^k}}{\sigma_{q_j^k}}\right) \ge \alpha; \tag{2}$$

$$\max_{k\in K}\max_{j\in N^k} \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{m_{P_j^-} - 3\sigma_{P_j^-} - m_{P_j^k}}{\sigma_{P_j^k}}\right) \le \beta, \tag{3}$$

$$\Omega_k^{/}: \ c_r\overline{q}_r\,|\,\overline{q}_r\,|^{\gamma-1} + \sum_{i\in M_1} b_{1ri}c_i\overline{q}_i\,|\,\overline{q}_i\,|^{\gamma-1} = 0, \quad r\in M_2^k; \tag{4}$$

$$\overline{P}_1^{\alpha} - \overline{P}_r^{\alpha} + \sum_{i\in M_1} b_{1ri}c_i\overline{q}_i\,|\,\overline{q}_i\,|^{\gamma-1} = 0, \quad r\in L_{22}^k; \tag{5}$$

$$q_r = \sum_{i\in M_2^k\cup L_{22}^k\cup N_{22}^k} b_{1ir}\overline{q}_i + \sum_{i\in L_{21}^k\cup N_{21}^k} b_{1ir}\overline{q}_i, \quad r\in M_1^k\cup L_1^k; \tag{6}$$

$$P_j^{(k)-} \le \overline{P}_j^{(k)} \le P_j^{(k)+}, j\in N_2^k; \tag{7}$$

$$\Omega_k^{//}: \quad q_i^{(k)-} \le \overline{q}_i^{(k)} \le q_i^{(k)+}, i\in L^k, \tag{8}$$

где неравенства (2) и (3) определяют область Ω_1, ограничения в виде равенств (4) – (6) и неравенство (7) определяют область $\Omega_k^{/}$, двусторонняя ограниченность переменных $\overline{q}_j^{(k)}$ (8) определяет область $\Omega_k^{//}$; $k=\overline{1,K}$ – количество уровней сети (обычно $K=3$); $j=\overline{1,N^k}$ – количество выходов на k-м уровне сети; $\Omega=\Omega_1\cup\Omega_2$, где Ω_1 – область, на которой выполняются неравенства (2) и (3), $\Omega_2 = \bigcup_{k=1}^{K}\Omega_k$, где Ω_k – область, на которой выполняются ограничения типа равенств (4) – (8) на k-м уровне, $\Omega_k=\Omega_k^{/}\cup\Omega_k^{//}$; M^k – множество реальных дуг графа сети: M_1^k – реальные ветви, M_2^k – фиктивные хорды; L^k – множество фиктивных дуг графа по входам сети: L_1^k – фиктивные ветви, L_2^k – фиктивные хорды; N_2^k – множество фиктивных хорд графа по выходам сети; $\overline{P}_j, j\in N_2^k$ – математическое ожидание давления на выходах сети k-го уровня; $\overline{q}_i, i\in L^k$ – математическое ожидание расхода на входах сети k-го уровня; c_i – коэффициент гидравлического сопротивления i-го участка трубопровода; b_{1ir} – элементы цикломатической матрицы для сети k-го уровня; α,β –

коэффициенты нелинейности модели транспорта газа по участку трубопровода для сетей высокого, среднего и низкого давления[9].

Критерий (1) характеризует сумму избыточных давлений во всех узлах многоуровневой газораспределительной сети, минимизация которой обеспечивает сокращение непроизводительных потерь природного газа, минимизацию рисков возникновения аварийных ситуаций и техногенных катастроф, связанных с утечками природного газа (взрывами, пожарами и т.п.).

Критериальное ограничение (2) гарантирует, что режимная устойчивость всех регуляторов давления (ГРС, ГРП, ПРП) на всех уровнях газораспределительной сети будет больше либо равна некоторому фиксированному числу $\alpha \approx 1$. При этом минимизируется вероятность автоматического отключения групп потребителей, находящихся в зоне нагрузки соответствующего регулятора (ГРС, ГРП, ПРП), и соответствующие потери, связанные с восстановлением режимов.

Выполнение критериального ограничения (3) гарантирует, что вероятность возникновения дефицита природного газа во всех узлах газораспределительной сети будет меньше либо равна заданной величине $\beta \approx 0$.

Связь между k-м и $(k+1)$-м уровнями осуществляется с помощью модели регулятора, которая имеет вид:

$$P_j^{(k-1)-} = f(P_j^{(k)}, q_j^{(k)+}) \qquad (9)$$

и связывает между собой минимально-допустимое давление на входе регулятора $P_j^{(k-1)-}$ с максимальным расходом $q_j^{(k)+}$ и величиной стабилизируемого давления $P_j^{(k)}$ на его выходе.

3. Алгоритм решения задачи оптимизации плановых режимов транспорта и распределения газа в МГРС

Исходными данными для решения задачи (1) – (9) на интервале времени $[0, T]$ является нормативно-справочная информация о структуре и параметрах газопровода для каждого из k уровней МГРС.

Оперативные данные: плановые прогнозируемые значения математических ожиданий и дисперсий расходов $\bar{q}_j, \sigma^2_{q_j}, j \in N_2^k, k = \overline{1,K}$ всех потребителей МГРС k-го уровня; дисперсии стабилизируемых давлений на выходах всех регуляторов давлений (ГРС, ГРП, ПРП) на входах каждого из уровней МГРС $\sigma^2_{P_i}, i \in L^k, k = \overline{1,K}$.

Результатом решения задачи являются: оптимальное значение математических ожиданий $\bar{q}_j^{(k)*}, j \in L^k, k = \overline{1,K}$ плановых расходов газа на всех регуляторах давления на каждом из k уровней, при котором достигает минимума целевая функция (1) и выполняются критериальные ограничения (2) – (3), ограничения в виде равенств (4) – (6) и системы неравенств (7) – (8); дисперсии прогнозируемых расходов природного газа через каждый из регуляторов $\sigma^2_{q_i}, i \in L^k, k = \overline{1,K}$ и дисперсии давлений на входах каждого из потребителей $\sigma^2_{P_j}, j \in N_2^k, k = \overline{1,K}$; математические ожидания давлений во всех узлах газораспределительной сети каждого из k уровней и математические ожидания расходов по каждому реальному участку трубопровода на каждом из k уровней; оптимальное значение целевой функции I_0^*.

Для обеспечения выполнения системы ограничений, входящих в область Ω_k, используется гидравлический расчет сети k-го уровня с применением метода «диктующей точки».

3.1. Алгоритм расчета сети k-го уровня и определение местоположения «диктующей точки»

Известны следующие начальные данные на каждом из k уровней сети для интервала времени $[0,T]$: нормативно-справочная информация для каждого из k уровней; математические ожидания расходов на входах k-го уровня: $\overline{q}_j, j \in L_2^k$; математические ожидания расходов на выходах k-го уровня: $\overline{q}_i, i \in N_2^k$; минимально-допустимые давления на выходах k-го уровня: $P_i^-, i \in N_2^k$.

Решается задача гидравлического расчета сети k-го уровня, которая сводится к системе уравнений (10) – (11).

Для получения начального распределения давлений решаем следующую систему уравнений:

$$f_r = c_r \overline{q}_r \, | \overline{q}_r | + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i \overline{q}_i \, | \overline{q}_i | = 0, \quad r \in M_2^k; \tag{10}$$

$$\overline{q}_i = \sum_{r \in M_2^k \cup L_{22}^k \cup N_{22}^k} b_{1ri} \overline{q}_r + \sum_{r \in L_{21}^k \cup N_{21}^k} b_{1ri} \overline{q}_r, \quad i \in M_1^k \cup L_1^k. \tag{11}$$

В результате решения системы (10) – (11) получаем перепады давлений по всем дугам k-го уровня сети. Далее находится «диктующая точка» сети k-го уровня. «Диктующая точка» – это номер выхода (ГРП), выполнение ограничения на давление в которой влечет за собой выполнение этих условий на всех остальных ГРП (т.е. на всех ГРП, кроме «диктующего», устанавливается не менее чем минимально-допустимое давление).

Для определения «диктующей точки» будем использовать следующее уравнение:

$$f_r = \overline{P}_r^2 - \overline{P}_1^2 + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i \overline{q}_i \, | \overline{q}_i | = 0, \quad r \in N_{22}^k. \tag{12}$$

Для r-го выхода ($r \in N_{22}^k$) задаем давление, равное минимально-допустимому P_r^-. Далее рассчитываем по формуле (12) математическое ожидание давления на входе $\overline{P}_1$ (давление в начале 1-й дуги дерева, соединенной с нулевой вершиной графа). Проделав указанную операцию для всех $r \in N_{22}^k$ выходов, находим максимальное давление $\overline{P}_1$. Соответствующий ему номер выхода и будет «диктующей точкой».

Используя найденное давление $\overline{P}_1$, находим математические ожидания давлений на выходах. Для этого будем использовать ту же формулу (12), но в обратном направлении: известно $\overline{P}_1$, не известны $\overline{P}_r, r \in N_{22}^k$.

Необходимым условием успешного поиска «диктующей точки» является выполнение неравенства $\overline{P}_r \geq P_r^-$ для найденных таким образом $\overline{P}_r, r \in N_{22}^k$, причем в самой «диктующей точке» должно достигаться равенство: $\overline{P}_r^* = P_r^-$.

3.2. Вычисление оценок статистических свойств зависимых переменных в зависимости от статистических свойств независимых переменных

Для выполнения ограничений на расход и давление, заданных неравенствами (7) и (8), используется метод дисперсий.

На интервале времени $[0,T]$ даны:

1. Математические ожидания давлений на входах k-го уровня сети: $\overline{P}_j, j \in L^k$.
2. Математические ожидания расходов на выходах k-го уровня сети: $\overline{q}_i, i \in N_2^k$.
3. Дисперсии давлений на входах k-го уровня сети: $\sigma_{P_j}^2, j \in L^k$.
4. Дисперсии расходов на выходах k-го уровня сети: $\sigma_{q_i}^2, i \in N_2^k$.

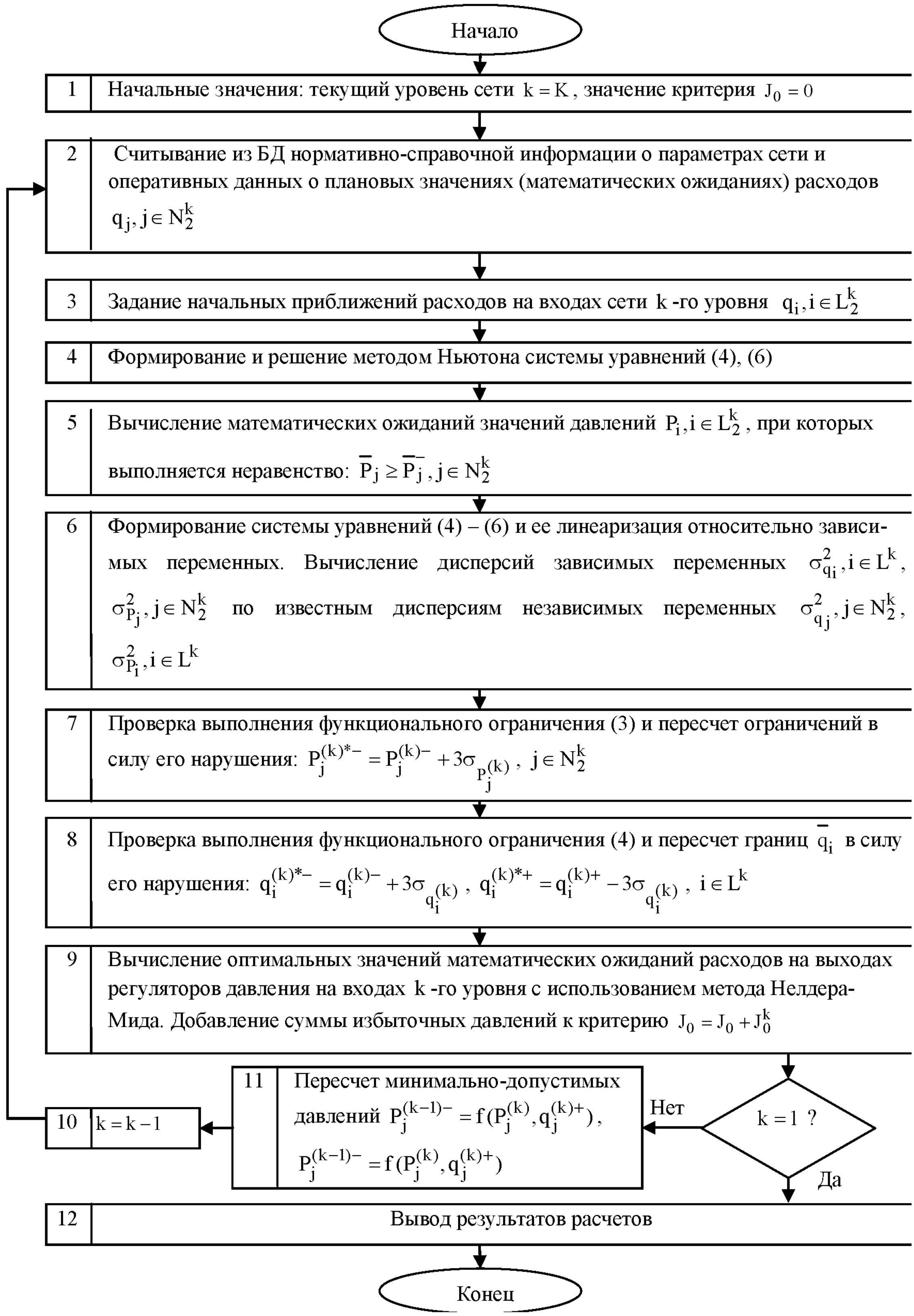

Рис. 1. Блок-схема общего алгоритма решения

Требуется найти:

1. Дисперсии расходов на входах k-го уровня сети: $\sigma^2_{q_j}, j \in L^k$.

2. Дисперсии давлений на выходах k-го уровня сети: $\sigma^2_{P_i}, i \in N_2^k$.

Представим зависимые переменные $q_j, j \in L^k$ и $P_i, i \in N_2^k$ в виде неявных функций:

$$\overline{q}_j = q_j(\overline{P}_j, j \in L^k;\ \overline{q}_i, i \in N_2^k), j \in L^k; \tag{13}$$

$$\overline{P}_i = P_i(\overline{P}_j, j \in L^k;\ \overline{q}_i, i \in N_2^k), i \in N_2^k. \tag{14}$$

Для получения явного выражения для дисперсий воспользуемся методом статистической линеаризации. Получим:

$$\sigma^2_{q_j} = \sum_{i \in N_2^k} \left[\frac{\partial \overline{q}_j}{\partial \overline{q}_i}\right]^2 \sigma^2_{q_i} + \sum_{i \in L^k} \left[\frac{\partial \overline{q}_j}{\partial \overline{P}_i}\right]^2 \sigma^2_{P_i},\ j \in L^k; \tag{15}$$

$$\sigma^2_{P_j} = \sum_{i \in N_2^k} \left[\frac{\partial \overline{P}_j}{\partial \overline{q}_i}\right]^2 \sigma^2_{q_i} + \sum_{i \in L^k} \left[\frac{\partial \overline{P}_j}{\partial \overline{P}_i}\right]^2 \sigma^2_{P_i},\ j \in N_2^k. \tag{16}$$

Эти выражения получены в предположении, что ковариационная матрица случайных величин $\overline{P}_j, j \in L^k$ и $\overline{q}_i, i \in N_2^k$ диагональна (т.е. случайные величины независимы).

Для вычисления дисперсий далее требуется найти частные производные зависимых переменных по независимым. Воспользуемся следующей системой уравнений:

$$f_r = c_r \overline{q}_r |\overline{q}_r| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i \overline{q}_i |\overline{q}_i| = 0, \quad r \in M_2^k; \tag{17}$$

$$f_r = \overline{P}_1^2 - \overline{P}_r^2 + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i \overline{q}_i |\overline{q}_i| = 0, \quad r \in L_{22}^k; \tag{18}$$

$$f_r = -\overline{q}_r + \sum_{i \in M_2^k \cup L_{22}^k \cup N_{22}^k} b_{1ir} \overline{q}_i + \sum_{i \in L_{21}^k \cup N_{21}^k} b_{1ir} \overline{q}_i, \quad r \in M_1^k \cup L_1^k. \tag{19}$$

Искать производные будем из решения следующих систем линейных уравнений [2]:

$$S_r = \begin{cases} \dfrac{\partial f_1}{\partial x_r} + \dfrac{\partial f_1}{\partial y_1} \cdot \dfrac{\partial y_1}{\partial x_r} + \ldots + \dfrac{\partial f_1}{\partial y_m} \cdot \dfrac{\partial y_m}{\partial x_r} = 0, \\ \ldots \\ \dfrac{\partial f_m}{\partial x_r} + \dfrac{\partial f_m}{\partial y_1} \cdot \dfrac{\partial y_1}{\partial x_r} + \ldots + \dfrac{\partial f_m}{\partial y_m} \cdot \dfrac{\partial y_m}{\partial x_r} = 0, \end{cases} \tag{20}$$

где $f_r, r \in \overline{1,m}$ –уравнения системы (17) – (19); $x_r \in V_x = \{\overline{P}_j, j \in L^k;\ \overline{q}_i, i \in N_2^k\}$ – независимые переменные; $y_r \in V_y = \{q_j, j \in L^k;\ P_i, i \in N_2^k\}$ – зависимые переменные.

Систем такого вида будет $r = \overline{1, \mathrm{Card}(V_x)}$. Эти системы однозначно разрешимы, так как однозначно разрешима исходная система (17) – (19). Соответственно, их определители отличны от нуля:

$$J_r = \frac{D(F_1, \ldots, F_m)}{D(y_1, \ldots, y_m)} \neq 0.$$

В явном виде решение каждой из систем можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_r} = -\frac{\dfrac{D(F_1, \ldots, F_m)}{D(x_r, \ldots, y_m)}}{\dfrac{D(F_1, \ldots, F_m)}{D(y_1, \ldots, y_m)}}, \quad \ldots \quad, \frac{\partial y_m}{\partial x_r} = -\frac{\dfrac{D(F_1, \ldots, F_m)}{D(y_1, \ldots, x_r)}}{\dfrac{D(F_1, \ldots, F_m)}{D(y_1, \ldots, y_m)}}.$$

3.3. Минимизация суммы избыточных давлений в узлах МГРС

Суть задачи оптимизации сводится к такой последовательности шагов:

1. При заданных расходах на входах $\bar{q}_j, j \in L^k$ и выходах $\bar{q}_i, i \in N_2^k$ k-го уровня сети находим посредством гидравлического расчета (10) – (11) перепады давлений на всех участках трубопровода.
2. Находим диктующую точку (см. пункт 3.1).
3. Основываясь на давлении в «диктующей точке», находим давления на остальных выходах k-го уровня сети.
4. Далее находим сумму разностей текущего давления и минимально-допустимого на каждом выходе k-го уровня сети: $\sum\limits_{i \in N_2^k} (\bar{P}_j - P_j^-)$.

Полученная сумма и будет суммой избыточных давлений для k-го уровня.

Для минимизации этой суммы по переменным $q_j, j \in L^k$ будем использовать модифицированный метод Нелдера-Мида. Его отличием от классического [3] является наличие проекции точки оптимизации на многогранник после проведения каждой из операций: отражение, растяжение, сжатие, редукция.

Для проецирования на многогранник требуется указать нижнюю и верхнюю границу для расходов $\bar{q}_j, j \in L^k$, а для подсчета суммы избыточных давлений – нижнюю границу (минимально-допустимое давление) для выходов k-го уровня сети: $P_i^-, i \in N_2^k$. Но учитывая ранее введенные критериальные ограничения, скорректируем границы изменения расходов:

$$q_j^{*-} \le q_j \le q_j^{*+}, j \in L^k,$$

где $q_j^{*-} = q_j^- + 3\sigma_{q_j}, j \in L^k$; $q_j^{*+} = q_j^+ - 3\sigma_{q_j}, j \in L^k$.

При этом гарантируется, что полученное решение будет фактически более устойчивым, чем расчетное.

Также скорректируем нижнюю границу давления на каждом из входов потребителей $P_i^-, i \in N_2^k$:

$$P_i^{*-} = P_i^- + 3\sigma_{P_i}, i \in N_2^k.$$

В этом случае удовлетворение потребителя в необходимом количестве природного газа будет происходить с вероятностью $1 - \beta \approx 0{,}9975$.

4. Пример использования рассмотренного алгоритма

Не нарушая общности, рассмотрим решение задачи (1) – (9) для сети первого уровня (сети высокого давления). На рис. 2 представлен граф расчетной схемы кольца высокого давления МГРС города. В данной сети присутствуют:

1. На входе: 4 газораспределительные станции – ГРС (на рис. 2 вершины: 1, 40, 41, 42).
2. На выходах: 22 потребителя – газораспределительных пункта (ГРП) (на рис. 2 вершины: 50 – 74).

Для каждого участка также известны: длина участка трубопровода; внутренний диаметр трубы.

Известны оперативные данные по сети.

Критерий технической устойчивости равен 0.81.

Вероятность возникновения дефицита у потребителей: 0.51.

Для получения перепадов давлений на всех участках трубопровода задаем начальное распределение расходов по входам сети, решаем систему уравнений (4), (6).

Следующим этапом решения задачи оптимизации является поиск «диктующей точки», затем – вычисление дисперсий для решения системы (4) – (6) в точке разложения. Заданы математические ожидания и дисперсии расходов на выходе сети, математические ожидания и дисперсии давлений на входах сети.

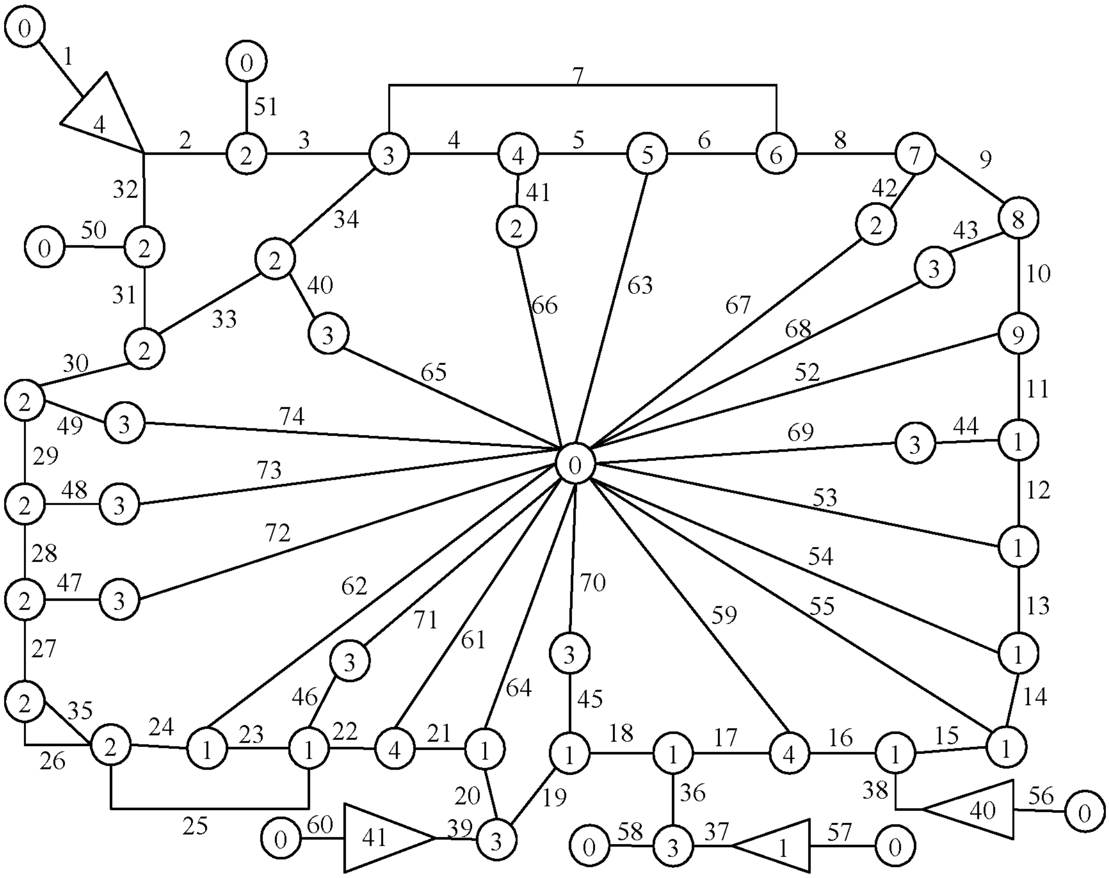

Рис. 2. Граф расчетной схемы кольца высокого давления МГРС города

Дисперсии по давлению брались из расчета, что длина диапазона изменения $(\overline{P}_j - 3\sigma_{P_j}; \overline{P}_j + 3\sigma_{P_j})$ равна $0.03 \cdot \overline{P}_j$, $j \in L$. Для расходов же этот коэффициент равнялся 50%: $0.5 \cdot \overline{q}_i$, $i \in N_2$. Таким образом, значения дисперсий вычислялись по формулам:

$$\sigma^2_{P_j} = [(0.03 \cdot \overline{P}_j)/6]^2; \quad \sigma^2_{q_i} = [(0.5 \cdot \overline{q}_i)/6]^2 .$$

На основе приведенных данных составляем уравнения (17) – (19).

Используя эти уравнения, составляем системы вида (20). Решая их, получаем искомые частные производные зависимых переменных по независимым в выражениях (15) – (16).

Рассчитав дисперсии давлений на выходах и расходов на входах, переходим непосредственно к оптимизации режима газораспределительной сети.

Исходные данные для задачи оптимизации указаны выше.

В качестве начальных приближений используем точки вида $\{q_{ГРС №2}, q_{ГРС №3}, q_{ГРС №4}\}$. ГРС №1 не указывается ввиду того, что:

$$q_{ГРС №1} = \sum_{i \in N_2^k} q_i - (q_{ГРС №2} + q_{ГРС №3} + q_{ГРС №4})$$

и данное уравнение участвует в решаемой системе (10) – (11). Начальные приближения имеют вид:

$$\vec{q}^{\,0} = \{36.0; 123.0; 90.0\}, \ \vec{q}^{\,1} = \{125.0; 104.167; 58.33\}, \ \vec{q}^{\,2} = \{125.0; 83.33; 0.0\} \ \vec{q}^{\,3} = \{137.5; 83.33; 41.66\}.$$

С учетом рассчитанных дисперсий давлений на выходах значения $P_i^-, i \in N_2$ будут изменены. Скорректированы также значения границ изменения расходов на входах (ГРС).

С учетом введенных ограничений сумма избыточных давлений для точек приближений такова:

$$\vec{q}^{\,0} : 22.6165 \text{ (атм.)}; \ \vec{q}^{\,1} : 27.2674 \text{ (атм.)}; \ \vec{q}^{\,2} : 29.1340 \text{ (атм.)}; \ \vec{q}^{\,3} : 21.9298 \text{ (атм.)}.$$

Допустимой погрешностью вычислений примем $\varepsilon = 10^{-4}$.

К заданной точности вычислений метод сошелся за 61 итерацию. Достигнутая погрешность: 0.0000865913. Точка оптимума:

$$\{q_{ГРС №1} = 173.472 \,(\text{тыс. м}^3/\text{час}); q_{ГРС №2} = 37.6645 \,(\text{тыс. м}^3/\text{час});$$

$$q_{ГРС №3} = 32.971 \,(\text{тыс. м}^3/\text{час}); q_{ГРС №4} = 162.892 \,(\text{тыс. м}^3/\text{час})\}.$$

Сумма избыточных давлений в точке оптимума: $J_0 = 20.1257$ (атм.).

Полученное оптимальное решение необходимо проверить на адекватность поставленной задаче. Для этого вычислим нижнюю границу критерия технической устойчивости (2):

$$q_{ГРС №1} : J_{j2}^{-} = 1.0;\; q_{ГРС №2} : J_{j2}^{-} = 0.998;\; q_{ГРС №3} : J_{j2}^{-} = 0.998;\; q_{ГРС №4} : J_{j2}^{-} = 1.0.$$

Она равна 0.998. Таким образом, мы полностью удовлетворяем критерию технической устойчивости .

Вероятность же возникновения дефицита у потребителей равняется 0.04, что является очень хорошим результатом.

Выводы

Предложен метод решения задачи оптимизации плановых режимов транспорта и распределения природного газа в газотранспортных сетях.

В настоящее время не существует общих методов решения задач такого типа ввиду их огромной размерности, особенно для газораспределительных сетей низкого и среднего давления (для $k \geq 2$), что делает работу актуальной.

Основными отличиями данного метода от существующих являются: при расчетах учитываются дисперсии расходов и давлений, а значит построенные прогнозы и доверительные интервалы, используемые при оптимизации, значительно больше отвечают реальности, чем в других аналогичных алгоритмах; в методе Нелдера-Мида добавлена операция проецирования на многогранник, что позволило оптимизируемые переменные держать в пределах реальных значений независимо от расчетных; при оптимизации используются модификации ограничений вида $(x_{min} + 3\sigma_x; x_{max} - 3\sigma_x)$ с учетом рассчитанных дисперсий. Использование такого подхода позволяет добиться результатов оптимизации, которые будут верны независимо от реальных значений расходов у потребителей с вероятностью, близкой к единице.

Разработанный метод является экономически целесообразным и выгодным в силу существенной минимизации вероятности отключения потребителей природного газа и связанных с ним издержек на восстановление режимов.

Использование данного метода для решения практической задачи показало его эффективность и возможность использования для задач ежедневного (суточного) планирования расхода газа в МГРС города.

Список литературы: **1.** *Тевяшев А.Д., Ткаченко В.Ф., Попов А.В.* Об одном классе задач оперативного планирования режимов работы многоуровневых газораспределительных сетей // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 3. С.103-110. **2.** *Фихтенгольц Г. М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. I. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 680 с. **3.** *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. М.: МИР, 1975. 536 с. **4.** *Simone.* Equations and methods. V.5. SIMONE Research Group s.r.o. LIWACOM Informationstechnik GmbH. 2002. 157 с. **5.** *ГОСТ* 30319.0-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения, 1996 . 11 с. **6.** *ГОСТ* 30319.1-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки, 1996. 25 с. **7.** *ГОСТ* 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости, 1996. 36 с. **8.** *ГОСТ* 30319.3-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния, 1996. 28 с. **9.** *ДБН* В.2.5-20-2001. «Газоснабжение» Госстрой Украины. Киев 2001. 68 с.

Поступила в редколлегию 17.09.2008

Тевяшев Андрей Дмитриевич, академик УНГА, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: теория стохастических моделей. Увлечения и хобби: теннис, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36, e-mail: tevjashev@kture.kharkov.ua.

Золотарев Денис Алексеевич, стажер кафедры прикладной математики ХНУРЕ. Научные интересы: математическое моделирование. Увлечение и хобби: программирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36, e-mail: Fenix_5@samsobaka.org.ua