

4. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств / В.М. Эльтерман. – М.: Стройиздат, 1980. – 288 с.

5. Рымкевич П. П. Физико-математические основы для описания нестационарной теплопроводности через ограждающие конструкции зданий и сооружений / П. П. Рымкевич, М. В. Хохлова, В. Б. Кокович, О. В. Рымкевич, А. С. Горшков // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции. 10-11.12.2009. – СПб., 2009. – С. 124-130.

6. ДБН В.2.6-2006. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. – К., 2006.

7. Сафин И. Ш. Экспериментальное определение влагосодержания по толщине ограждающей конструкции / И. Ш. Сафин, В. Н. Куприянов, Д. В. Крайнов, Р. А. Садыков // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 49-55.

8. Ватин Н. И. Влажностный режим стеновой ограждающей конструкции, выполненной из газобетонных блоков автоклавного твердения с облицовочным слоем из лицевого силикатного кирпича / Н.И. Ватин, А. С. Горшков, Г. И. Гринфельд, И. И. Пестряков // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 56-70.

9. Согомонян И.А. Анализ температурно-влажностного режима газобетона / И.А.Согомонян, П.С.Зырянов, Г.И.Гринфельд // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 85-86.

10. Леонтьева Ю. Н. Тепловлажностный режим ограждающих конструкций при наружном и внутреннем утеплении / Ю. Н. Леонтьева // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции. 10-11.12.2009. – СПб., 2009. – С. 76-79.

11. Гнип О. П. Кінетика зміни вологості стін з вапняку-черепашника у разі капілярного всмоктування вологи і її випаровування / Науковий вісник НЛТУ України. – 2009. – № 19.1. – С. 85-89.

12. Кнацько М. В. Опыт испытания стеновой конструкции в лабораторных и натуральных условиях с целью прогнозирования ее эксплуатационного срока службы / М. В. Кнацько, И. И. Пестряков, А. С. Горшков, П. П. Рымкевич // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции. 10-11.12.2009. – СПб., 2009. – С. 56-65.

Отримано 12.11.2012

УДК 621.6:622.32:691

И.И.КАПЦОВ, д-р техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

В.А.КОЛЯДЕНКО

УкрНИИГаз, г. Харьков

МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Изменения в режимах добычи и потребления природного газа приводят к существенным изменениям доли природного газа в топливно-энергетическом балансе. Это может

приводить к появлению «узких мест» в системах газоснабжения региона. В работе усовершенствованы методы расчета оптимальных режимов региональных газотранспортных систем.

Зміни в режимах видобутку і споживання природного газу наводять до істотних змін частини природного газу в паливно-енергетичному балансі регіону. Це може призвести до появи «вузьких місць» в системі газопостачання регіону. У роботі вдосконалено методи розрахунку оптимальних режимів регіональних газотранспортних систем.

Change in the modes of booty and consumption of natural gas result in the substantial changes of stake of natural gas in fuel and energy balance of region. It can result in appearance of «bottlenecks» in the system of gas-supplying of region. The methods of calculation of the optimum modes of the regional gas-transport systems are in-process improved.

Ключевые слова: газотранспортные системы, станция подземного хранения газа, компрессорные станции.

Региональные газотранспортные системы являются сложными системами многоуровневой структуры, основными из которых являются:

- газотранспортные системы (ГТС), включающие магистральные газопроводы (МГ), станции подземного хранения газа (СПХГ) и газовые промыслы (ГП), характеризующие четкими режимно - технологическими контурами;

- компрессорные и газораспределительные станции (КС и ГРС), установки комплексной подготовки газа на ГП и СПХГ [1].

Для решения задач оптимизации режимов и реконструкции выделим следующие категории потребления газа:

а) на технологические нужды промышленных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных предприятий;

б) на нужды отопления и горячего водоснабжения;

в) на хозяйственно-бытовые и коммунальные нужды жилых и общественных зданий, предприятий общественного питания и объектов коммунально-бытового назначения.

Потребители газа категории «а» характеризуются относительным постоянством во времени и хорошей управляемостью, в соответствии с утвержденным графиком ограничений (для предприятий, имеющих возможность использования альтернативных видов топлива). Потребители категорий «б» и «в» характеризуются значительной неравномерностью во времени, обусловленной значительными колебаниями отопительной нагрузки, связанной с изменением температуры наружного воздуха и сложной системой управления поставок газа.

Целью оптимизации режимов региональной ГТС является определение оптимальных конструктивных и режимных параметров системы для обеспечения и компенсации воздействий на систему ГТС внутренних и внешних связей.

Учитывая многокритериальность требований к поставкам природного газа, с учетом очередности и важности, потребителей можно разделить на две группы. К первой группе потребителей газа, обеспечиваемых, в первую очередь относятся:

а) население;

б) предприятия общественного питания и бытового обслуживания населения, санитарно-гигиенические, учебные, лечебные учреждения, дошкольные и другие учреждения коммунального и культурно-бытового назначения, а также котельные, оборудование которых конструктивно не приспособлено к работе на других видах топлива;

в) потребители, у которых отключение газа или понижение давления в газопроводе вызывает нарушение технологического процесса и влечет за собой остановку оборудования или материальный ущерб вследствие порчи или недоотпуска продукции.

Ко второй группе потребителей газа относятся электростанции и промышленные предприятия, газоснабжение которых в периоды экстремальных величин снижения температуры и в других мажорных случаях должно регулироваться путем частичного или полного перевода их на альтернативные виды топлива в установленном порядке.

В связи с этим поставка природного газа представляется в виде задачи оптимизации с последовательными критериями:

I критерий – минимум недопоставки природного газа потребителям первой группы;

II критерий – минимум недопоставки природного газа потребителям второй группы;

III критерий – минимум затрат на транспорт и распределение природного газа.

В постановке задачи расширения и реконструкции ГТС стоит вопрос о необходимости определения "узких мест" существующих систем. Как указывалось в [1] применительно к трубопроводным системам, это требует предварительной постановки и решения различных задач по оптимизации режимов их работы. В отдельных случаях может оказаться, что необходимое увеличение пропускной способности газопроводных сетей может быть достигнуто путем оптимизации режимов их работы. Только если это невозможно, следует принимать решение о реконструкции. Данный подход может рассматриваться в рамках морфогенетического метода на начальном этапе его развития, так как в нем предусматривается реконфигурация систем в процессе функционирования системы.

Рассматривается региональная газотранспортная система, которая представляется в виде графа $G(J, I)$, где J – множество вершин (узлов) графа, I – множество дуг (участков) графа. Множество вершин состоит из трех подмножеств $J = J_1 \cup J_2 \cup J_3$, где J_1 – множество вершин источников системы, J_2 – множество вершин потребителей, J_3 – множество узлов сочленения сети.

Для каждого j -го узла потребителя выделяются следующие расходы газа:

$q_{кбj}$ – расход газа на коммунально-бытовые нужды, отопление и горячее водоснабжение;

$q_{пртбj}$ – расход газа на промышленные нужды, который не может быть заменен альтернативным топливом;

$q_{прзj}$ – расход газа на промышленные нужды, который может быть заменен альтернативным топливом (максимально возможный объем высвобождаемого газа).

Для расхода газа на коммунально-бытовые нужды известна зависимость от температуры наружного воздуха $q_{кбj} = q_{кбj}(t_{nj})$. Расходы

$q_{пртбj}$ и $q_{прзj}$ являются константами.

Обозначим через v_i расход газа по i -му участку сети $i \in I$. При транспорте газа по участкам магистральных газопроводов должен выполняться 1-й закон Кирхгофа, который в матричном виде имеет вид:

$$AV + Q = 0, \quad (1)$$

где A – матрица инцидентий сети; $V\{v_i\}$ – вектор расходов газа по участкам; $Q\{q_j\}$ – вектор узловых расходов. При этом узловым расходам, поступающим в узел, приписываем знак «плюс», выходящим из узла – «минус».

Фактический узловой расход q_j в j -м узле-потребителе должен удовлетворять неравенству (без учета знака q_j):

$$0 \leq q_j \leq q_{\max j}, j \in J_2, \quad (2)$$

где $q_{\max j} = q_{кбj} + q_{пртбj} + q_{прзj}$.

Фактический узловой расход q_j в j -м узле-источнике должен удовлетворять ограничению неравенству на производительность источника

$$0 \leq q_j \leq q_{i\text{mc}}, j \in J_1, \quad (3)$$

где $q_{i\text{mc}}$ – максимальная производительность источника.

При транспорте газа по участку с расходом v_i наблюдается расход газа на технологические нужды, который обозначим через Δv_i , так что в начале каждого i -го участка расход газа по участку равен $v_i + \Delta v_i$, а в конце участка – просто v_i . Будем считать известными зависимости расхода газа на собственные технологические нужды Δv_i от величины транспортируемого расхода газа

$$\Delta v_i = f_i(v_i), i \in I. \quad (4)$$

Как указывалось ранее, эти зависимости носят нелинейный характер, так что система уравнений (1) становится нелинейной относительно расходов по участкам Δv_i .

Для расходов по участкам имеются также ограничения в виде неравенств

$$|v_i| \leq v_{\text{max } i}, i \in I, \quad (5)$$

где $v_{\text{max } i}$ – имеет смысл максимальной пропускной способности i -го участка сети.

Искомое оптимальное распределение потоков газа должно удовлетворять совокупности критериев. Сформулируем критерий F_1 как критерий удовлетворения совокупности ограничений в следующем общем виде

$$F_1 = \begin{cases} 0, & \text{если выполняются все условия (1) – (5),} \\ \Delta \geq 0, & \text{если не выполняется хотя бы одно из условий (1) – (5).} \end{cases} \quad (6)$$

Определим критерий F_2 как критерий недопоставки газа потребителям 1-й группы:

$$F_2 = \begin{cases} 0, & \text{если } q_j \geq q_{\text{кб}j}, \\ \left\| q_j - (q_{\text{кб}j} + q_{\text{пртб}j}) \right\|, & \text{если } q_j < q_{\text{кб}j} + q_{\text{прт}j}, \end{cases} \quad (7)$$

где знак $\left\| \cdot \right\|$ означает знак нормы, например – модуля, или квадрата расогласования.

Определим критерий F_3 как критерий недопоставки газа потребителям 2-й группы:

$$F_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } q_j \geq q_{к\bar{0}j} + q_{нр\bar{m}\bar{0}j} + q_{нр\bar{p}j} = q_{\max j}, \\ \|q_j - q_{\max j}\|, & \text{если } q_{к\bar{0}j} + q_{нр\bar{m}\bar{0}j} \leq q_j < q_{\max j}, \\ \|q_j - (q_{к\bar{0}j} + q_{нр\bar{m}\bar{0}j})\|, & \text{если } q_j < q_{к\bar{0}j} + q_{нр\bar{m}\bar{0}j}. \end{cases} \quad (8)$$

Определим критерий F_4 как критерий затрат на реализацию планируемого режима в общем виде:

$$F_4 = \sum_{i \in I} c_i(v_i) + \sum_{j \in J_1} c_j(q_j), \quad (9)$$

где функции затрат $c_i(v_i)$, $c_j(q_j)$ считаются известными.

Задача оптимизации режима формулируется следующим образом. Требуется определить вектор узловых расходов $Q(q_i)$ и расходы по хордам сети $\{v_k\}$, $k=1,2,\dots,K$, которые бы удовлетворяли ограничениям (1)-(5) и минимизировали критерии F_2, F_3, F_4 :

$$F_2 \rightarrow \min, F_3 \rightarrow \min, F_4 \rightarrow \min. \quad (10)$$

При определении методов оптимизации распределения потоков газа в региональных газотранспортных системах рассматривается статическая задача проектирования газоснабжающей сети: задается неориентированный граф $G(y, u)$, вершины которого y_1, \dots, y_K соответствуют источникам, потребителям или являются точками разветвления потока газа, а дуги u_1, \dots, u_M соответствуют участкам газопроводов без промежуточного отбора газа. Пусть I_1, I_L – множество индексов соответственно вершин-источников и вершин-потребителей, a_r – максимальная мощность r -го источника $r \in I_1$, b_r – интенсивность потребления $r \in I_2$. Требуется каждой дуге u_j , ориентированной определенным образом, составить переменные x_j и каждому источнику – мощность z_r , $r \in I_1$ таким образом, чтобы минимизировать некоторую функцию потерь, функцию запишем в виде:

$$\Phi(x, z) = \sum_{j=1}^m \phi_j(|x_j|) + \sum_{r \in I_1} \psi(z_r), \quad (11)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned}
 - \sum_{j \in A_r} \varepsilon_{rj} x_j &= z_r \leq a_r, \quad z_r \geq 0, \quad r \in I_1, \\
 \sum_{j \in A_r} \varepsilon_{rj} x_j &= b_r, \quad r \in I_2, \\
 \sum_{j \in A_r} \varepsilon_{rj} x_j &= 0, \quad r \notin I_1 \cup I_2,
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где A_r – множество индексов дуг, инцидентных вершине y_r ; ε_{rj} принимает значение 1 или -1 в зависимости от того, ориентирована ли дуга u_j к вершине y_r или от нее; x_j – пропускные способности газопровода, соответствующего дуге u_j ; $\varphi_j(|x_j|)$ – составляющие целевой функции, отвечающие приведенным строительно-эксплуатационным затратам для j -го участка сети; $\psi(z_r)$ – приведенные затраты, соответствующие мощности источника.

Как видно из постановки задачи (11), (12), здесь требуется в точности и в полной мере удовлетворить всем требуемым расходам потребителей b_r без всякого различия в характере потребителей. В реальности такое требование не может быть выполнено, и далее рассматриваем такие ситуации.

Для решения уравнений (11), (12), (19), (20) предложен специальный двухэтапный прием. Аналогичные принципы заложены в оптимизацию развития ГТС с учетом динамики [2]. Здесь существенным моментом модели является введение фактора времени и выделение нескольких расчетных схем развития ГТС. Для каждой схемы требуется удовлетворить потребителей в газе и минимизировать приведенные затраты на весь период развития.

Пользуясь обозначениями ранее введенными I_1, I_2, I_3 для множеств индексов вершин графа сети, где расположены соответственно источники, потребители сети и узлы сочленения газопроводов. Примем узлы j из I_1 отрицательными, а узлы j из I_2 положительными. Абсолютная величина отрицательного ресурса указывает максимум подачи газа в систему от источника, а положительный ресурс равен расчетному уровню спроса. Для узлов сочленения – $b_j = 0$.

Каждой дуге соответствуют величины: x_{ij} – количество транспортируемого в единицу времени газа, α_{ij} – пропускная способность, C_{ij} – удельные затраты на единицу потока.

Задача максимизации подачи газа потребителям записывается в виде:

$$\sum_{i \in I_2} x_i \rightarrow \max, \quad (13)$$

$$\sum_{i \in M_j^+} x_{ij} - \sum_{i \in M_j^-} x_{ji} = \begin{cases} x_j, j \in I_1 \cup I_2, \\ 0, j \in I_3, \end{cases} \quad (14)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq \alpha_{ij}, (i, j) \in G, \quad (15)$$

$$x_j \geq b_j, j \in I_1 \cup I_2. \quad (16)$$

Условия (12) выражают баланс подачи и отбора газа в узлах сети, причем M_j^+ – множество узлов, из которых дуги заходят в узел j , M_j^- – выходят из узла j , Ограничения [2,4] показывают, что подача газа в систему не может превышать производительности источника, а потребителю нужно поставить газа не менее необходимого количества.

В [2] приводятся и модификации задачи (13)-(16). Задача максимизации прибыли получается, если целевую функцию представить в виде:

$$\sum_{i \in I_2} C_i x_i - \sum_{j \in I_1} C_j x_j - \sum_{(i), j \in G} C_{ij} x_{ij} \rightarrow \max. \quad (17)$$

Задача о максимальном потоке в сети получается, если ввести дополнительно узлы O и N , которые назовем общим источником и общим стоком, соединив все источники с узлом O , а все потребители с N .

Тогда:

$$\sum_{j \in I_1} x_{Oj} = \sum_{i \in I_2} x_{iN} = V \rightarrow \max, \quad (18)$$

а ограничения имеют вид:

$$\sum_{i \in M_j^+} x_{ij} - \sum_{i \in M_j^-} x_{ji} = \begin{cases} -V, j = O, \\ 0, j \neq O, N, \\ V, j = N, \end{cases} \quad (19)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq \alpha_{ij}, (i, j) \in G. \quad (20)$$

Для решения задачи о максимальном потоке в сети известен ряд алгоритмов, например, Форда-Фалкерсона, Басакера-Гоуэна, Клейна [2].

Перечисленные задачи отличны от требований к распределению потоков газа в ГТС с учетом сформулированной многокритериальности.

Задача о максимальном потоке в сети или ее модификация при изменении целевой функции в виде $\sum_{(i), j \in G} C_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$ являются весьма

приближенными, так как не учитывают расход газа на магистральных газопроводах на технологические нужды, который функционально зависит от объемов перекачиваемого газа. Расход газа на технологические нужды включает в себя затраты топливного газа, потери газа из-за отсутствия абсолютной герметичности и вызываемые профилактическим отключением и пуском оборудования, возможными отказами. Зависимость расхода газа на технологические нужды ΔV от величины транспортируемого расхода газа V является существенно нелинейной $\Delta V = f(V)$ [3]. Согласно 1-го закона Кирхгофа в этом случае удобно производить линеаризацию зависимости $\Delta V = f(V)$.

Принимаем четыре варианта критерия оптимальности:

- минимум отклонений от эталонного потокораспределения;
- минимум недоподачи газа потребителям в соответствии с системой приоритетов, учитывающей категории потребителей и очередность использования ресурсов;
- минимум сокращения производительности системы газоснабжения;
- критерий общего вида, являющийся обобщением первых трех случаев.

Поиск численных решений многоцелевой оптимизации в [3] описывается на введении штрафных функций в функцию целей. Задавая необходимые значения коэффициентам стоимости (штрафа) в целевой функции, лицо, принимающее решение (ЛПР) может «заказать» более предпочтительные для него варианты и исследовать «поведение» решения в этом случае. Отметим, что такой подход обладает и недостатками, т.к. на результате решения сказываются плохо формализуемые субъективные факторы при назначении штрафов в целевой функции.

Имеются формулировки задач [4], где многокритериальность требований к распределению газа в ГТС сводится к задачам с последовательными критериями, которые называются задачами с лексикографическими отношениями выбора [5]. Лексикографическое отношение предпочтения для решения u по отношению к решению V означает, что выполняется одно из следующих условий (K_1, \dots, K_S – критерий оптимизации):

$$\begin{aligned} 1) \quad & K_1(u) > K_1(V), \\ 2) \quad & K_1(u) = K_1(V), \quad K_2(u) > K_2(V), \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned} 3) \quad & K_l(u) = K_l(V), \quad l = 1, \overline{(S-1)}, \quad K_S(u) > K_S(V), \\ (S+1) \quad & K(u) = K(V). \end{aligned} \tag{22}$$

Условие (22) – условие эквивалентности решений u , V . Если выполняется одно из условий (21) или же (22), то решение u лексикографически не хуже (не менее предпочтительно), чем V .

Наиболее простой способ решения задач лексикографической оптимизации – это сведение задачи к однокритериальной путем свертки критериев в вид $\Phi = \sum_{r=1}^s \alpha_r K_r$, о чем указывается в [4], ссылаясь на результаты [5]. Но, как показано в [5], если множество V допустимых решений бесконечно (даже только лишь счетное), то коэффициенты α_r , обеспечивающие функционалу Φ искомое свойство, вообще говоря, не существуют. В таком случае использование свертки критериев в один критерий (тем или иным способом) неправомерно, т.к. не дает полного соответствия многокритериальной и однокритериальной задачи. Необходимы специальные методы решения задач подобного типа.

Заключение

1. Разработаны математические модели оптимизации режимов работы и реконструкции региональных газотранспортных систем. Показано, что в отдельных случаях может оказаться, что необходимое увеличение пропускной способности газопроводных сетей может быть достигнуто путем оптимизации режимов их работы. Только если это невозможно, следует принимать решение о реконструкции.

2. Разработаны новые постановки задач оптимизации режимов и оптимизации реконструкции региональных газотранспортных систем с учетом многокритериальности как оптимизацию по нескольким последовательным критериям. При этом оптимизация реконструкции осуществляется при оптимизации режимов работы газотранспортной системы для обеспечения системной надежности. Такой подход рассматривается в рамках морфогенетического метода обеспечения потокораспределения.

1.Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / Меренков А.П., Хасилев В.Я. – Д.: Наука, 1985. – 278 с.

2.Сухарев М.Г. Оптимальное развитие систем газоснабжения./ Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е. – М.: Недра, 1931. – 294 с.

3.Брянских В.Е. Управление потокораспределением в системе газоснабжения. – Обз. информ. Серия: важнейшие научно-технические проблемы газовой промышленности, р.5 – М.: ВНИИЭгазпром, 1985. – 35с.

4.Оптимизация расчетов развития газотранспортных систем. – Газовая промышленность. Серия: Автоматиз., телемехан. и связь в газ. пром-ти: Обз. информ., Вып.4. – ВНИИЭгазпром, 1982. – 25 с.

5.Подиновский З.В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / Подиновский З.В., Гаврилов В.М. – С.: Сов. радио, 1975. – 192 с.

Получено 30.01.2013