

Математическое моделирование оптимизации развития и реконструкции системы газоснабжения

Запропонована нелінійна дискретно-неперервна математична модель для вирішення задачі оптимального планування розвитку та реконструкції системи газопостачання на перспективу.

Предложена нелинейная дискретно-непрерывная математическая модель для решения задачи оптимального планирования развития и реконструкции системы газоснабжения на перспективу.

Сегодня газовая промышленность Украины развивается в условиях ограниченности отечественных ресурсов — собственная добыча составляет около 20% от уровня потребления, а остальное покрывается за счет импорта из России и Туркмении. Поиск новых альтернативных источников поставок газа в Украину, а также расширение использования украинских газопроводов для транзитной подачи газа в Западную Европу предопределяют дальнейшее развитие системы газоснабжения (СГС). Вместе с тем в настоящее время возникла и дальше будет приобретать более широкие масштабы проблема реконструкции. Она обусловлена тем, что газопроводы, построенные в 60–70-х годах, физически и морально устарели. Некоторые из них уже достигли нормативного срока службы, другие приближаются к нему, в результате чего технико-экономические показатели таких газопроводов значительно снижены. Это приводит к увеличению потерь при транспорте газа и перерасходу топлива при его компримировании. В связи с этим сегодня актуальной является задача оптимального планирования развития и реконструкции системы газоснабжения на перспективу.

Системы газоснабжения относятся к классу больших систем энергетики. Изучение таких систем осуществляется на основе методологии системных исследований в энергетике [2], неотъемлемой частью которой стало использование методов математического моделирования и оптимизации [1, 3].

В данной статье предложена динамическая дискретно-непрерывная математическая модель, предназначенная для решения задачи оптимального планирования развития и реконструкции системы газоснабжения на перспективу. В качестве исходных данных выступает избыточная схема газоснабжающей системы. Она строится исходя из существующей путем добавления вариантов строительства новых и реконструкции устаревших объектов СГС. В результате решения данной задачи должны быть определены такие параметры системы газоснабжения на перспективу, при которых, во-первых, система обеспечивает необходимым количеством газа всех потребителей, во-вторых,

ресурсы используемые при развитии и реконструкции системы, не превышают выделенных, и, в-третьих, приведенные суммарные затраты на капитальное строительство и эксплуатационные расходы за весь рассматриваемый период времени минимальны.

Система газоснабжения представляется как совокупность объектов добычи, транспорта и потребления газа. Газодобывающие районы, газовые хранилища и пункты потребления связаны между собой сетью магистральных газопроводов.

Каждому объекту системы газоснабжения в любой момент времени можно поставить в соответствие два параметра — производственную мощность и производительность [4]. Производственная мощность объекта равна его максимальной производительности. Первый параметр характеризует возможности объекта и зависит только от его состояния, а второй — показывает, как в данный момент используется производственная мощность объекта. Для магистральных газопроводов эти параметры интерпретируются соответственно как максимальная пропускная способность и величина потока газа по газопроводу в данный момент времени; для газового хранилища — его максимальный объем и текущий объем хранимого газа.

Развитие системы газоснабжения происходит, во-первых, за счет развития структуры системы, а во-вторых, за счет развития (реконструкции) ее отдельных объектов. Развитие структуры предполагает возможность появления новых объектов — газодобывающих районов, потребителей, газовых хранилищ и магистральных газопроводов. Под развитием (реконструкцией) объекта (в том числе и нового) подразумевается изменение его состояния, приводящее к увеличению (в основном) или уменьшению (довольно редко) производственной мощности объекта.

Производственная мощность объекта зависит от состояния его основных фондов и уровня капитальных вложений. Для каждого объекта может существовать несколько допустимых вариантов развития (реконструкции), причем различные варианты отличаются друг от друга техническими решениями. Таким образом, каждый вариант развития (рекон-

рукции) объекта представляет собой стратегию последовательного увеличения производственной мощности до некоторой наперед заданной величины. Множество всех вариантов развития (реконструкции) объекта можно интерпретировать как модель данного объекта. Так как производственная мощность объекта не зависит от состояния других объектов системы, то независимыми друг от друга являются и модели отдельных объектов, и, следовательно, они могут быть построены отдельно для каждого объекта на этапе подготовки исходных данных. С другой стороны, выбор оптимального варианта развития (реконструкции) объекта не может быть осуществлен без учета производительности объекта в тот или иной момент времени. Это объясняется тем, что производительность показывает как используется производственная мощность и определяет себестоимость работы объекта. В то же время производительность объекта зависит от связей с другими объектами системы и их производительностей. Таким образом, оптимальные варианты развития (реконструкции) отдельных технологических объектов системы газоснабжения и их производительности в различные моменты времени расчетного периода должны определяться в модели, которая оптимизирует развитие и реконструкцию всей системы в целом.

Процесс моделирования развития технологических объектов состоит в построении для каждого варианта развития (реконструкции) объекта множества технико-экономических характеристик (ТЭХ), которые отражают функциональные зависимости уровня капитальных вложений, величины эксплуатационных затрат и объемов лимитированных ресурсов от производственной мощности и производительности объекта, зависящих в свою очередь от технических решений при реализации того или иного варианта. Выбор оптимального варианта развития (реконструкции) объекта означает выбор наиболее эффективных с точки зрения экономических показателей технических решений для данного объекта, учитывающих режимы его функционирования. Зависимости экономических показателей объекта от технических решений, используемых при его развитии (реконструкции), представляют собой так называемые технико-экономические характеристики.

Каждый вариант развития (реконструкции) объекта определяется совокупностью технико-экономических характеристик трех видов. ТЭХ I-го вида выражает зависимость приведенных затрат (капитальные вложения и независимая от производительности составляющая эксплуатационных затрат) от увеличения производственной мощности объекта на протяжении расчетного периода при данном варианте развития. Технико-экономическая характеристика II-го вида является функцией величины эксплуатационных затрат (часть, зависящая

от производительности) от производительности объекта на всех этапах расчетного периода. Характеристики III-го вида отражают зависимости расхода лимитированных ресурсов, используемых для развития (реконструкции), от наращивания производственной мощности объекта в течении расчетного периода.

Для учета динамики развития системы газоснабжения расчетный период разбивается на несколько (T) временных этапов. Предполагается, что объекты системы газоснабжения развиваются дискретно, то есть на протяжении одного временного этапа их состояние и параметры остаются постоянными и могут изменяться при переходе от одного временного этапа к другому. В качестве исходных данных задаются состояния всех объектов СГС на начало расчетного периода, а также объемы газопотребления и объемы лимитированных ресурсов, используемых при развитии и реконструкции, по этапам расчетного периода.

Систему газоснабжения удобно представлять в виде ориентированного графа, где множество вершин соответствует множеству узлов I (объекты добычи, хранения, потребления и поступления газа в систему), а множество дуг — множеству магистральных газопроводов N без промежуточного отбора газа.

Множество узлов I состоит из четырех подмножеств: газодобывающие районы (или узлы поступления газа в систему) — I_1 ; потребители, возле которых есть газовые хранилища — I_2 ; потребители без хранилищ — I_3 ; узлы разветвления потока газа (то есть узлы, потребление в которых равно нулю) — I_4 . Пара узлов $i \in I$ и $j \in J$ определяет магистральный газопровод $(i, j) \in N$ из узла i в узел j . Если возможна работа газопровода в других направлениях, то в граф, соответствующий системе газоснабжения, вводятся две дуги $(i, j) \in N$ и $(j, i) \in N$. Магистральным газопроводам и узлам подмножеств I_1 и I_2 на каждом временном этапе t расчетного периода ставятся в соответствие производственная мощность (переменные y) и производительность (переменные x).

Для учета сезонной неравномерности газопотребления производительности газопроводов и газодобывающих районов на каждом временном этапе рассматриваются отдельно в летний и зимний сезоны. Соответствующие переменные имеют верхний индекс "л" или "з". Для объектов хранения газа предполагается, что объем закачиваемого летом газа равен объему газа, отбираемого из хранилища зимой, и поэтому производительность хранилища в летний и зимний сезоны принимается равной объему хранимого газа.

Выбор для каждого объекта системы газоснабжения одного варианта развития (реконструкции) из всего множества осуществляется через булевы переменные Z_k (для магистральных газопроводов и

узлов подмножеств I_1 и I_2), где k — номер варианта ($k=1, \dots, M$), а M — общее число вариантов развития (реконструкции) объекта. Эти переменные определяются следующим образом:

$$Z_k = \begin{cases} 1, & \text{если при оптимизации выбран } k\text{-ый вариант;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\text{причем } \sum_{k=1}^M Z_k = 1.$$

Целевая функция представляет собой суммарные приведенные затраты на развитие (реконструкцию) отдельных объектов системы и их эксплуатацию в течение рассматриваемого расчетного периода. Затраты для каждого объекта задаются в виде суммы попарных произведений затрат по отдельному варианту развития (реконструкции) данного объекта на булеву переменную, соответствующую этому варианту. Таким образом, целевая функция имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in N} \sum_{k=1}^M [f_{(i,j)k}^I(y_{(i,j)0}, y_{(i,j)1}, \dots, y_{(i,j)T}) + f_{(i,j)k}^{II}(x_{(i,j)1}^n, x_{(i,j)2}^n, \dots, x_{(i,j)T}^n) + \\ & + f_{(i,j)k}^{III}(x_{(i,j)1}^3, x_{(i,j)2}^3, \dots, x_{(i,j)T}^3)] \cdot Z_{(i,j)k} + \sum_{i \in I_1} \sum_{k=1}^M [\varphi_{ik}^I(y_{i0}, y_{i1}, \dots, y_{iT}) + \\ & + \varphi_{ik}^{II}(x_{i1}^n, x_{i2}^n, \dots, x_{iT}^n) + \varphi_{ik}^{III}(x_{i1}^3, x_{i2}^3, \dots, x_{iT}^3)] \cdot Z_{ik} + \sum_{i \in I_2} \sum_{k=1}^M [\psi_{ik}^I(y_{i0}, y_{i1}, \dots, y_{iT}) + \\ & + \psi_{ik}^{II}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iT})] \cdot Z_{ik} \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (1)$$

где f, φ, ψ — нелинейные функции, представляющие технико-экономические характеристики соответственно транспорта, добычи и хранения газа (первый нижний индекс задает объект, второй — указывает номер варианта развития (реконструкции), верхний индекс определяет вид ТЭХ).

Система ограничений, определяющая множество допустимых решений, включает ограничения пяти видов. Основными являются балансовые ограничения, задающие условия баланса газа в каждом узле: объем поступающего в узел газа равен объему потребляемого и отбираемого. Условия баланса записываются для летнего и зимнего сезонов каждого этапа расчетного периода.

Для узлов, соответствующих газодобывающим районам, суммарное количество отбираемого газа равно производительности данного объекта, то есть объему добываемого газа:

$$\sum_{j \in A_i^+} x_{(i,j)t}^n = x_{it}^n, \quad t=1, \dots, T, \quad i \in I_1, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A_i^+} x_{(i,j)t}^3 = x_{it}^3, \quad t=1, \dots, T, \quad i \in I_1, \quad (3)$$

где A_i^- — подмножество узлов $j \in I$, связанных с узлом i газопроводом $(i,j) \in N$.

Для узлов, соответствующих пунктам потребления с газовыми хранилищами, условия баланса в летний и зимний сезоны различны. Летом производительность газопроводов, приходящих в узел (объем поступающего газа), за вычетом производительности газопроводов, выходящих из узла (объем отбираемого газа) и производительности хранилища (объем хранимого газа) равен объему потребляемого газа в данном узле:

$$\sum_{j \in A_i^+} (1 - \alpha_{(i,j)t}^n) \cdot x_{(i,j)t}^n - \sum_{j \in A_i^-} x_{(i,j)t}^n - x_{it}^n = P_{it}^n, \quad (4)$$

$$t=1, \dots, T, \quad i \in I_2,$$

где A_i^+ — подмножество узлов $j \in I$, связанных с узлом i газопроводом $(j,i) \in N$; P_{it}^n — потребность в газе в летний сезон в узле i на t -ом временном этапе; $\alpha_{(i,j)t}^n$ — коэффициент потерь и расхода газа на собственные нужды на газопроводе $(j,i) \in N$ в летний сезон t -го временного этапа.

Для зимнего сезона условие баланса отличается тем, что производительность газового хранилища берется с противоположным знаком, то есть если летом объем хранимого газа интерпретируется как количество газа, закачиваемое в хранилище, то зимой — как количество газа, отбираемое из него:

$$\sum_{j \in A_i^+} (1 - \alpha_{(i,j)t}^3) \cdot x_{(i,j)t}^3 - \sum_{j \in A_i^-} x_{(i,j)t}^3 + (1 - \beta_{it}) x_{it}^3 = P_{it}^3, \quad (5)$$

$$t=1, \dots, T, \quad i \in I_2,$$

где P_{it}^3 — потребность в газе в зимний сезон в узле i на t -ом временном этапе; $\alpha_{(i,j)t}^3$ — коэффициент, аналогичный $\alpha_{(i,j)t}^n$ для зимнего сезона; β_{it} — коэффициент потерь и расхода газа на собственные нужды при хранении в узле i на t -ом временном этапе.

Балансовые ограничения для пунктов потребления без газовых хранилищ являются частным случаем ограничений (4), (5) при условии, что производительность хранилища (объем хранения) равна нулю:

$$\sum_{j \in A_i^+} (1 - \alpha_{(i,j)t}^n) \cdot x_{(i,j)t}^n - \sum_{j \in A_i^-} x_{(i,j)t}^n = P_{it}^n, \quad (6)$$

$$t=1, \dots, T, \quad i \in I_3,$$

$$\sum_{j \in A_i^+} (1 - \alpha_{(i,j)t}^3) \cdot x_{(i,j)t}^3 - \sum_{j \in A_i^-} x_{(i,j)t}^3 = P_{it}^3, \quad (7)$$

$$t=1, \dots, T, \quad i \in I_3.$$

Условия баланса для узлов разветвления потока записывается аналогично ограничениям (6), (7) с учетом того, что потребление в этих узлах равно нулю:

$$\sum_{i \in I_1} (1 - \alpha_{(i,j)t}^n) \cdot x_{(i,j)t}^n - \sum_{i \in I_2} x_{(i,j)t}^n = 0, \quad (8)$$

$$t = 1, \dots, T, \quad i \in I_4,$$

$$\sum_{i \in I_1} (1 - \alpha_{(i,j)t}^3) \cdot x_{(i,j)t}^3 - \sum_{i \in I_2} x_{(i,j)t}^3 = 0, \quad (9)$$

$$t = 1, \dots, T, \quad i \in I_4.$$

Следующая группа ограничений устанавливает связь между производственной мощностью объекта и его производительностью — производительность объекта в произвольный момент времени не превышает его производственную мощность:

$$x_{(i,j)t}^n \leq y_{(i,j)t}^n; \quad x_{(i,j)t}^3 \leq y_{(i,j)t}^3; \quad t = 1, \dots, T, \quad (i, j) \in N, \quad (10)$$

$$x_i^1 \leq y_i^1; \quad x_i^3 \leq y_i^3; \quad t = 1, \dots, T, \quad i \in I_1, \quad (11)$$

$$x_i^3 \leq y_i^3; \quad t = 1, \dots, T, \quad i \in I_2. \quad (12)$$

Третья группа ограничений содержит ресурсные ограничения:

$$\sum_{i \in I_1} \sum_{k=1}^{M_{(i,j)}} f_{(i,j)k}^m(y_{(i,j)t}^n, y_{(i,j)t}^3) \cdot Z_{(i,j)t}k + \sum_{i \in I_1} \sum_{k=1}^{M_i} \varphi_{ik}^m(y_{(i,j)t}^n, y_i^n) \cdot Z_{ik} + \sum_{i \in I_2} \sum_{k=1}^{M_i} \psi_{ik}^m(y_{(i,j)t}^n, y_i^n) \cdot Z_{ik} \leq R_l, \quad t = 1, \dots, T, \quad l = 1, \dots, L. \quad (13)$$

где $f_{(i,j)k}^m$, φ_{ik}^m , ψ_{ik}^m — функции, которые представляют технико-экономические характеристики m -го вида для k -го варианта развития (реконструкции) соответственно магистрального газопровода $(i, j) \in N$, газодобывающего района $i \in I_1$ и газового терминала $i \in I_2$, отражающие зависимости расхода l -го вида лимитированного ресурса при увеличе-

нии производственной мощности перед t -ым временным этапом;

L — общее число лимитированных видов ресурсов;

R_l — количество лимитированного ресурса вида l , выделенного на развитие системы газоснабжения перед t -ым временным этапом.

Ограничения четвертого вида описывают условия выбора одного варианта развития (реконструкции) для каждого объекта системы:

$$\sum_{k=1}^{M_{(i,j)}} Z_{(i,j)t}k = 1, \quad Z_{(i,j)t}k \in \{0; 1\}, \quad (i, j) \in N, \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^{M_i} Z_{ik} = 1, \quad Z_{ik} \in \{0; 1\}, \quad i \in I_1 \cup I_2. \quad (15)$$

Последняя группа ограничений определяет неотрицательность и дискретность переменных, соответствующих производственным мощностям, и неотрицательность переменных, соответствующих производительностям объектов.

Представленная таким образом математическая модель оптимизации развития и реконструкции системы газоснабжения представляет собой задачу нелинейного программирования со смешанными переменными (непрерывными, дискретными и булевыми), причем целевая функция и ресурсные ограничения содержат произведения нелинейных функций (ТЭХ) на булевы переменные. В настоящее время для решения таких задач не существует универсальных эффективных методов, что приводит к необходимости разработки специальных методов, которые, учитывая свойства и особенности СГС в целом и ее объектов, позволяет преобразовать предложенную модель таким образом, чтобы применить существующие методы математического программирования.

1. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. — Киев: Наукова думка, 1987. — 200 с.

2. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. — М.: Наука, 1983. — 456 с.

3. Маренков А.П. Развитие тематического моделирования в системных энергетических исследованиях // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1985 — №6. — С.58-65.

4. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е. Оптимальное развитие систем газоснабжения. — М.: Недра, 1981. — 294 с.