

УДК 620:621.31

Б.А. КОСТЮКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, І.Ч. ЛЕЩЕНКО, канд. техн. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ РИНКОВИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Наведено принципи побудови та формалізації основних залежностей оптимізаційної моделі для прогнозування розвитку газової промисловості, які враховують особливості ринкової економіки та вимоги до мінімізації негативного впливу на довкілля відповідно до міжнародних природоохоронних зобов'язань України.

При прогнозуванні розвитку газової промисловості необхідно визначити вплив від упровадження в різних обсягах окремих технологій видобування, зберігання і транспортування природного газу на техніко-економічні показники системи газопостачання в цілому, її екологічну ефективність. Крім того, необхідно визначити умови, за яких використання цих технологій буде економічно доцільним та інвестиційно-привабливим. При створенні математичних моделей розвитку газової промисловості використано загальні принципи формалізації моделей її об'єктів, описані в [1, 2], які визначають основні вимоги до розробки моделей формування й аналізу варіантів розвитку як паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) у цілому, так і його галузевих підсистем, дозволяють підходити до їх розробки з єдиних позицій.

Систему газопостачання представлено об'єктами видобування, транспорту, збереження і споживання газу. Розвиток системи відбувається за рахунок реконструкції окремих об'єктів або розвитку структури самої системи. Для кожного об'єкта може існувати кілька припустимих варіантів розвитку (реконструкції), які відрізняються застосуванням різних технологій. Припустимі варіанти розвитку можна інтерпретувати як моделі даного об'єкта.

За технологічними особливостями всі об'єкти системи газопостачання розбито на дві множини – множину магістральних газопроводів N і множину вузлів I . Магістральні газопроводи зв'язують газовидобувні райони, підземні сховища газу (ПСГ), пункти споживання в єдине ціле, надають системі газопостачання чітко виражений мережний характер. У зв'язку з цим систему газопостачання традиційно представляють у вигляді орієнтованого графа [3], де множина вершин відповідає множині вузлів, а множина дуг – множині магістральних газопроводів без проміжного відбору газу. Кожна пара вузлів $i \in I$ та $j \in I$ визначає магістральний газопровід $(i, j) \in N$, потік газу в якому направлений від вузла i до вузла j . Для газопроводу, який може працювати в двох напрямках, у граф вводяться дві дуги $(i, j) \in N$ та $(j, i) \in N$.

Множину вузлів умовно поділено на підмножини, які мають певні специфічні особливості:

- газовидобувні підприємства I_1 ;
- вузли надходження імпортного газу в систему I_2 ;
- вузли розташування газових сховищ I_3 ;
- споживачі газу I_4 ;
- вузли розгалуження потоку газу, в яких немає споживання газу, I_5 ;
- вузли відбору газу з системи на експорт I_6 .

Приймається, що впродовж одного часового етапу τ розрахункового періоду T стан і параметри об'єктів системи газопостачання залишаються постійними, зміни відбуваються лише при переході від одного часового етапу до іншого.

В умовах планової економіки при рішенні оптимізаційних задач найчастіше використовується такий критерій оцінки ефективності капіталовкладень в об'єкти газової галузі, як мінімум приведених витрат. Із переходом економіки України до ринкових відносин з'явилася необхідність рішення більш широкого спектру задач, пов'язаних із визначенням економічної ефективності капітальних вкладень в енергетичні об'єкти та оцінки ефективності їх роботи. Актуальними стають задачі оцінки можливості та доцільності впровадження нових технологій, визначення їх порівняльної ефективності при побудові нових і реконструкції існуючих об'єктів газової промисловості. За таких умов в якості критерію в моделях використовується мінімізація вартості послуг із постачання газу для споживачів країни та забезпечення транспорту газу на експорт. Отже, для формування критерію необхідно розраховувати вартісні оцінки послуг із транспортування, видобування та зберігання природного газу.

Згідно з підходами, запропонованими науковим співробітником С.В. Шульженком, використовуються такі показники, як вартість послуги за життєвий цикл, середньорічна вартість за життєвий цикл, собівартість і ціна. Вони можуть бути розраховані за цінами певного року для всього життєвого циклу об'єкта або приведені до середньорічного значення.

Ціну кожної послуги, що надається об'єктами газової промисловості на етапі τ , позначено таким чином:

– $C_{i\tau}^g$ – ціна газу, що видобувається на i -му підприємстві країни, $i \in I_1$;

– $C_{i\tau}^{imn}$ – ціна імпортованого газу на кордоні України, $i \in I_2$. Значення ціни імпортованого газу на кордоні України задається експертно;

– $C_{(i,j)\tau}^{mp}$ – ціна послуг із транспортування газу магістральним газопроводом (i, j) до споживачів, ПСГ та на експорт;

– $C_{i\tau}^{PCG}$ – ціна послуг i -го ПСГ, $i \in I_3$.

Цільова функція задачі має вигляд:

$$\sum_{\tau=1}^T \left(\sum_{i \in I_1} \sum_{k=1}^{M_i} C_{ik\tau}^g y_{ik\tau} z_{ik} + \sum_{i \in I_2} C_{i\tau}^{imn} y_{i\tau} + \sum_{i \in I_3} \sum_{k=1}^{M_i} C_{ik\tau}^{PCG} (1 - \beta_{i\tau}^{(z)}) y_{ik\tau} z_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in U_j} \sum_{k=1}^{M_i} C_{(i,j)k\tau}^{mp} (1 - \alpha_{(i,j)\tau}^{(z)}) y_{(i,j)k\tau} z_{(i,j)k} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

тут U_i – підмножина вузлів $j \in I$, зв'язаних з вузлом i газопроводу; $y_{i\tau}$ – відповідно: для вузлів підмножини I_1 – кількістю газу, що видобувається; підмножини I_2 – кількістю газу, що імпортується; підмножини I_3 – кількістю газу, що зберігається у i -му ПСГ на етапі τ ; $y_{(i,j)\tau}$ – фактична продуктивність газопроводу (i, j) на етапі τ ; $\beta_{i\tau}^{(z)}$ – коефіцієнт втрат і витрат газу на власні потреби при збереженні у ПСГ вузла i у літній або зимовий період; $\alpha_{(i,j)\tau}^{(z)}$ – споживання газу на технологічні потреби магістрального газопроводу (j, i) у літній або зимовий період.

Перший доданок у формулі (1) визначає вартість усього газу власного видобутку, другий – вартість усього імпортованого газу, третій – вартість послуг ПСГ, четвертий – вартість послуг транспортування газу як споживачам країни, так і на експорт.

Основною метою галузевої моделі є вибір для кожного об'єкта системи газопостачання одного варіанта розвитку з множини, що є моделлю об'єкта. Для цього для магістральних газопроводів і вузлів введено булеві змінні z_k , де k – номер варіанта ($k=1, \dots, M_i$), M_i – загальне число варіантів розвитку об'єкта. Тобто, $z_k=1$, якщо при оптимізації обрано варіант k , та $z_k=0$ у протилежному випадку.

В загальному випадку ціна послуг із видобування, транспортування та зберігання газу складається з чотирьох основних статей витрат, кожна з яких має свої особливості розрахунку залежно від типу об'єкта, що моделюється:

– капітальні витрати (C^K) – це витрати на створення об'єкта газопостачання, що включають витрати на розробку проекту, спорудження ви-

робничих потужностей, а також начальну підготовку персоналу;

– постійні витрати для підтримки виробничих потужностей у працездатному стані (C^{IB}) ("умовно-постійні" витрати) – це переважно витрати на поточні ремонти виробничих потужностей, погашення відсотків за банківськими кредитами, заробітна плата персоналу;

– амортизаційні відрахування (C^A) – ці витрати, відповідно до загальноприйнятих у світі податкових систем, враховуються у вартості виробництва продукції або у вартості послуг; методика їх розрахунку залежить від конкретного податкового законодавства держави, а також від поточної балансової вартості основних фондів, яка може змінюватись відповідно до змін фінансово-економічної системи;

– змінні витрати (C^{3B}) – це витрати на придбання матеріальних ресурсів для забезпечення виробництва основної продукції (надання основних послуг), виплати податкових зобов'язань. Ця складова витрат суттєво залежить від стану виробничого обладнання та режимів його використання, які впливають на обсяги споживання паливних та інших матеріальних ресурсів на виробничі потреби. Від стану виробничого обладнання та режимів його використання залежать також обсяги викидів забруднюючих речовин і парникових газів у довкілля та рівень платежів за них.

До доходної частини віднесено залишкову ринкову вартість об'єкта, а також основних фондів (C^3) після виводу об'єкта з експлуатації.

Необхідно зазначити, що капітальні витрати на основні фонди та амортизаційні відрахування взаємопов'язані, оскільки амортизація за змістом є поверненням інвестицій протягом життєвого циклу об'єкта. Щоб уникнути подвійного врахування інвестиційних ресурсів, які спрямовані на створення основних фондів, необхідно обсяг цих ресурсів враховувати у складі або інвестицій C^K , або амортизаційних відрахувань C^A .

З використанням означених складових вартість послуг i -го об'єкта газопостачання за життєвий цикл для k -го варіанта розвитку визначається за формулою

$$C_{ik}^{scu} = \sum_{\tau=1}^n C_{ik\tau}^K \times (1+r_i)\tau + \sum_{\tau=n+1}^{T+n} \frac{C_{ik\tau}^{PB} + C_{ik\tau}^{3B}}{(1+r_i)^{\tau-n}} - \frac{C_{ik}^3}{(1+r_i)^T}, \quad (2)$$

де r_i – рівень реального дисконту; n – термін будівництва об'єкта з моменту початку вкладення перших інвестицій в нього і до часу його пуску в експлуатацію, T – термін експлуатації об'єкта. У формулі (2) не використовуються амортизаційні

відрахування, оскільки вважається, що їх обсяг дорівнює обсягу капіталовкладень; номінальна вартість грошей відповідає останньому етапу будівництва об'єкта.

Середньозважена вартість за життєвий цикл пов'язана з простою вартістю згідно з формулою:

$$C_{ik}^{сжц} = C_{ik}^{сжц} \left[\frac{r_i(1+r_i)^T}{(1+r_i)^T - 1} \right]. \quad (3)$$

Середньозважена собівартість послуг із видобування, транспортування або зберігання газу за життєвий цикл об'єкта визначається за виразом:

$$C_{ik}^{cc} = \frac{C_{ik}^{сжц}}{\left[\frac{\sum_{\tau=n+1}^T Q_{ik\tau}}{(T-n-1)} \right]}, \quad (4)$$

де $Q_{ik\tau}$ – обсяг відповідно транспортованого, видобутого газу або газу, що зберігався у ПСГ.

Для розрахунку рівня цін на послуги об'єктів газової галузі необхідно визначити середній за рік гранично-прийнятний дохід, який забезпечує граничний рівень прибутковості для господарів об'єктів. Для всього життєвого циклу об'єкта газопостачання гранично-прийнятний дохід від надання відповідних послуг визначається за формулою:

$$C_{ik}^{джц} = \sum_{\tau=1}^T \left[\frac{C_{ik\tau}^{PB} + C_{ik\tau}^{3B} + Tax_{ik\tau} + R_{ik\tau} + C_{ik\tau}^{3P}}{(1+r_i)^\tau} \right], \quad (5)$$

де $Tax_{ik\tau}$ – обсяг сплачених корпоративних податків; $R_{ik\tau}$ – чистий прибуток; $C_{ik\tau}^{3P}$ – повернення основної частки займаних фінансових ресурсів.

Значення середнього за рік гранично-прийнятнього прибутку розраховується згідно з виразом:

$$C_{ik}^{сжц} = C_{ik}^{джц} \left[\frac{r_i(1+r_i)^T}{(1+r_i)^T - 1} \right]. \quad (6)$$

Середньозважена гранично-прийнятна ціна на послуги об'єктів видобування, зберігання і транспортування газу визначається за формулою:

$$C_{ik} = \frac{C_{ik}^{сжц}}{\left[\frac{\sum_{\tau=n+1}^T Q_{ik\tau}}{T} \right]}. \quad (7)$$

При розрахунку перелічених вище складових витрат необхідно прийняти до уваги особливості різних технологічних об'єктів газової галузі. Так при визначення вартості послуг із транспортування газу до складу змінних витрат C^{3B} включають витрати матеріалів, що використовуються на виробничо-експлуатаційні потреби. Суттєвою

складовою цих витрат є витрати на придбання електроенергії для роботи газоперекачувальних агрегатів з електроприводом для виробничо-технологічних потреб газотранспортної системи, які залежать від технічного стану і частково від наробітку обладнання компресорних станцій та лінійної частини газопроводів. Ця складова витрат є найбільш чутливою до зміни режиму роботи газопроводів. До власних потреб і втрат, крім паливного газу, відноситься газ, який стравлюється при пусках і зупинках компресорних агрегатів, витрачається при роботі пневматичних приводів, стравлюється через свічки газовіддільної системи ущільнення відцентрових нагнітачів, витрачається на продування ділянок газопроводу для звільнення його від конденсату, води, пороши; стравлюється з окремих ділянок газопроводу, комунікацій та агрегатів при ліквідації гідратоутворень, при профілактичних ремонтах, ревізії, заміні арматури тощо.

При визначенні статей витрат при видобуванні газу необхідно брати до уваги основні технологічні процеси, пов'язані з рухом газу від свердловини до подачі в газопровід: видобуток, первинна обробка, комплексна підготовка, промисловий та міжпромисловий транспорт, інтенсифікація видобутку газу. До капітальних витрат C^K при видобуванні газу належать обов'язкові платежі, пов'язані з підготовкою, освоєнням виробництва й експлуатацією: відрахування на відтворення мінерально-сировинної бази, збір за видачу ліцензій, плата за акваторію та ділянки морського дна, плата за користування надрами, пускові витрати в установках комплексної підготовки газу та головної споруди; плата за воду, що забирається газодобувним підприємством із водогосподарчих систем у межах установлених лімітів; витрати на рекультивацию земель. Змінні витрати C^{3B} суттєво залежать від технології видобутку сирого природного газу на конкретній свердловині, поділу його на газ і газовий конденсат, очищення й осушку газу на технологічних установках комплексної підготовки газу, збору сухого газу та передачі його в магістральний газопровід безпосередньо або через дожимну компресорну станцію.

При розрахунку собівартості послуг зі зберігання природного газу в підземних сховищах необхідно взяти до уваги такі особливості. До постійних витрат C^{IB} належать витрати, які підприємство несе протягом року, незалежно від періодів закачування або відбору газу та від обсягів газу, що знаходиться у сховищі. Тобто, це витрати на забезпечення зберігання газу в сховищі та

підтримання ПСГ (обладнання компресорного цеху, свердловини тощо) в належному технічному стані. Змінні витрати C^{3B} , навпаки, залежать від обсягів фактично закачаного або відібраного газу, ці витрати розподіляються між закачуванням та відбором у співвідношенні 50×50 . Більшу частину цих витрат становлять власні потреби – це паливний газ для компресорів, а також втрати газу на продувку свердловин на станціях ПСГ, через свічки газовіддільної системи ущільнення відцентрових нагнітачів і сальникові ущільнення компресорних циліндрів поршневого компресора.

Система обмежень моделі включає обмеження кількох видів. Основними є обмеження, що задають умови балансу газу в кожному вузлі – обсяг газу, що надійшов у вузол, дорівнює обсягові спожитого та відібраного газу. В балансових обмеженнях використовуються продуктивності всіх об'єктів газової галузі, які описують обсяги газу, що видобувається, транспортується, зберігається і споживається. Для врахування сезонної нерівномірності споживання газу розглядаються окремо літній та зимовий сезони. Від сезону залежать витрати і втрати газу на технологічні потреби обладнання компресорних станцій та ПСГ, які враховуються, відповідно, коефіцієнтами $\alpha_{(j,i)\tau}^{l(z)}$ та $\beta_{i\tau}^{l(z)}$, з верхнім індексом "л" або "з" залежно від сезону.

Для вузлів, що відповідають газодобувним районам I_1 , та вузлів надходження газу в систему I_2 сумарний об'єм газу, що відбирається, дорівнює об'єму газу, що видобувається (надходить) на часовому етапі τ . Для вузлів цього типу балансова умова є однаковою для зимового та літнього сезонів:

$$\sum_{j \in U_i^-} y_{(i,j)\tau} = y_{i\tau}, \quad i \in I_1, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I_2} \sum_{j \in U_i^-} y_{(i,j)\tau} = Q^{im}, \quad (9)$$

де U_i^- – підмножина вузлів $j \in I$, зв'язаних з вузлом i газопроводами, що відходять від нього; $y_{i\tau}$ – споживання газу у вузлі i на часовому етапі τ ; Q^{im} – кількість імпортованого газу.

Для вузлів передачі газу за межі країни сумарний об'єм газу, що надходить до вузла, дорівнює об'єму газу, що експортується:

$$\sum_{i \in I_6} \sum_{j \in U_i^+} y_{(i,j)\tau} = Q^{екс}, \quad (10)$$

тут U_i^+ – підмножина вузлів $j \in I$, зв'язаних з вузлом i газопроводами, що підходять до нього; $Q^{екс}$ – кількість газу, що транспортується магі-

стральними газопроводами на експорт. Це значення задається експертно.

Для вузлів, що відповідають пунктам споживання з газовими сховищами I_3 , умови балансу для літнього сезону мають такий вигляд:

$$\sum_{j \in U_i^+} (1 - \alpha_{(j,i)\tau}^l) y_{(j,i)\tau} - \sum_{j \in U_i^-} y_{(i,j)\tau} - y_{i\tau} = Q_{i\tau}^{снож}, \quad i \in I_3, \quad (11)$$

де $Q_{i\tau}^{снож}$ – споживання газу у вузлі i на етапі τ , яке визначається при рішенні задачі прогнозування розвитку ПЕК.

Перша складова умови (11) описує кількість газу, що надходить у вузол i усіма прилеглими газопроводами (j, i) ; друга – кількість газу, яка відбирається газопроводами (i, j) , що виходять з вузла; третя – обсяги газу, що закачуються у сховище i , що є характерним для літнього сезону. Для зимового сезону умова балансу відрізняється тим, що продуктивність газового сховища береться з протилежним знаком, тобто інтерпретується як кількість газу, що відбирається зі сховища:

$$\sum_{j \in U_i^+} (1 - \alpha_{(j,i)\tau}^z) y_{(j,i)\tau} - \sum_{j \in U_i^-} y_{(i,j)\tau} + (1 - \beta_{i\tau}^z) y_{i\tau} = Q_{i\tau}^{снож}, \quad i \in I_3. \quad (12)$$

Балансові обмеження для вузлів споживання без газових сховищ I_4 є окремим випадком обмежень (12) за умови, що обсяг збереження газу у сховищі дорівнює нулю:

$$\sum_{j \in U_i^+} (1 - \alpha_{(j,i)\tau}^{l(z)}) y_{(j,i)\tau} - \sum_{j \in U_i^-} y_{(i,j)\tau} = Q_{i\tau}^{снож}, \quad i \in I_4. \quad (13)$$

Умови балансу для вузлів розгалуження потоку I_5 записуються аналогічно до обмежень (13) з урахуванням того, що споживання в цих вузлах дорівнює нулю:

$$\sum_{j \in U_i^+} (1 - \alpha_{(j,i)\tau}^{l(z)}) y_{(j,i)\tau} - \sum_{j \in U_i^-} y_{(i,j)\tau} = 0, \quad i \in I_5. \quad (14)$$

Необхідно зазначити, що потік газу через кожний газопровід не може перевищувати його виробничу потужність:

$$y_{(i,j)\tau} \leq x_{(i,j)\tau}, \quad (i,j) \in N. \quad (15)$$

На продуктивність вузлів усіх типів також накладено обмеження, пов'язані з кількістю видобутого газу, обсягами його надходження, транспортування, зберігання. Так для вузлів підмножини I_3 обсяги газу, що закачуються до ПСГ або відбираються з нього, обмежені виробничою потужністю сховища:

$$y_{i\tau} \leq x_{i\tau}, \quad i \in I_3. \quad (16)$$

Для вузлів підмножини I_1 обсяги газу, що видобуваються, обмежені виробничою потужністю підприємства (свердловини):

$$y_{i\tau} \leq x_{i\tau}, \quad i \in I_1. \quad (17)$$

Ще одна група обмежень описує умови вибору одного варіанта розвитку для кожного об'єкта системи:

$$\sum_{k=1}^{M(i,j)} z_{(i,j)_k} = 1, \quad z_{(i,j)_k} \in \overline{0,1}, \quad (i,j) \in N, \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^{M_i} z_{i_k} = 1, \quad z_{i_k} \in \overline{0,1}, \quad i \in I_1 \cup I_2 \cup I_3, \quad (19)$$

де $z_{(i,j)_k}$, z_{i_k} – булеві змінні, що відповідають k -му варіанту для газопроводу та вузла видобування, імпорту (експорту) або зберігання газу.

Остання група обмежень визначає дискретність виробничих потужностей об'єктів і не-

від'ємність змінних, що описують продуктивності об'єктів:

$$x_{(i,j)_r} \in X_{(i,j)}, \quad y_{(i,j)_r} \geq 0, \quad (i,j) \in N, \quad (20)$$

$$x_{i_r} \in X_i, \quad y_{i_r} \geq 0, \quad i \in I_1 \cup I_3, \quad (21)$$

де $X_{(i,j)}$, X_i – кінцеві множини дискретних значень виробничих потужностей об'єктів транспорту і видобування та зберігання газу.

Отже, наведені рівняння та нерівності описують математичну модель прогнозування розвитку газової галузі, яка являє собою задачу математичного програмування зі змішаними змінними.

1. Розробка та вдосконалення методів та засобів дослідження довгострокового розвитку паливно-енергетичного комплексу України: Звіт про НДР / ЗЕ НАН України – № ДР 0101U003205. – К., 2003. – 289 с.

2. Розроблення теоретичних та методологічних основ і засобів прогнозування довгострокового розвитку паливно-енергетичного комплексу України в умовах ринкових та екологічних обмежень: Звіт про НДР / ЗЕ НАН України – № ДР 0104U006763. – К., 2006. – 335 с.

3. Оптимизация республиканского топливно-энергетического комплекса и его отраслевых систем / АН Украины. Ин-т проблем энергосбережения; Кулик М.Н., Юфа А.И., Костоковский Б.А. и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 215 с.