ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXVIII, №5, 1975 Серия технических наук

ЭНЕРГЕТИКА

Н. С. ХУРШУДОВ

К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В основе решения задачи перспективного планирования газотранспортных систем (ГТС) лежат алгоритмы расчета оптимального варианта магистрального газопровода (МГ) [1, 2 и др.], предъявляющие высокие требования к оперативной памяти и машинному времени ЭВМ.

Целью настоящей статьи является усовершенствование известных алгоритмов расчета оптимальных параметров МГ для снижения затрат машинного времени, путем обеспечения минимума числа переходов от теоретических параметров к стандартным.

Постановка задачи. Задаются: конфигурация линейной части (л. ч.) МГ с указанием числа участков (n), их длины (l_i), параметров существующих трубопроводов (d_i^{c}) и значения потоков газа по всем участкам (Q_i); допустимые пределы изменения давления газа в МГ ($p^{\min}$, $p^{\max}$) и предельно допустимая температура газа ($T^{\max}$); места расположения существующих и точки возможного строительства новых компрессорных станций (КС); сортамент труб $\{d_i\}$, рекомендуемый для строительства л. ч. и его экономические показатели $\{c_i\}$; типы и параметры КС, рекомендуемых для строительства (реконструкции), КС и их экономические показатели.

Требуется найти: оптимальные сочетания труб на всех расчетных участках, с учетом существующей л.ч.; оптимальные технические решения по реконструкции существующих и строительству новых КС; распределение по трассе МГ давлений и температур и затраты на развитие МГ.

Поскольку уровни потребления и потоки газа заданы, варианты будут отличаться величинами затрат на транспорт газа, значениями давлений и температур газа в узловых точках. Поэтому, в качестве критерия оптимальности выбирается минимум приведенных затрат на развитие и эксплуатацию МГ, а в качестве основной переменной состояния—давление газа; учет температуры осуществляется тем, что варианты, не удовлетворяющие температурным условиям, исключаются из рассмотрения. В связи с этим, для развития вариантов, в узловых точках МГ принимаются m дискретных значений давления газа $p_j(i)$ из множества $p(i) \subset P$: $p(i) = \{p_1(i), \ldots, p_j(i), \ldots, p_m(i)\}$. Множество допустимых вариантов образуется в результате варьирования элементами $u_j(i)$ множества $u(i) \subset U$ управляющих воздействий. Последовательность управлений $u(i)$, соответствующая последовательности состояний $p(i)$: $u(i)=\{u_1(i), \ldots, u_j(i), \ldots, u_m(i)\}$ как непрерывных, так и дискретных, характеризует, в зависимости от участка, число и диаметр труб газопровода, длины и диаметры лупингов и вставок, точки расположения, типы и параметры КС и др. Рассматриваемая задача представляет собой определение таких управляющих воздействий, при которых все потребители обеспечиваются заданными количествами газа при минимуме критериальной функции.

Расчетные уравнения и формулы. Сформулированная задача ставится как задача математического программирования. За критерий оптимальности принимается функция

$$З^{МГ}(U, P)=\min_{\{u(i)\}} \sum_{i=1}^{n} З_i(u(i),\ p(i)), \tag{1}$$

где $З^{МГ}(U, P)$, $З_i(u(i),\ p(i))$ — приведенные затраты на развитие, соответственно, всего МГ и его i-го участка.

Ограничения:

$$p^{min} \leqslant p_j(i) \leqslant p^{max};\ T_j(i) \leqslant T^{max};\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ m. \tag{2}$$

В качестве математического аппарата для решения поставленной задачи используется метод динамического программирования.

Критериальная функция в случае линейного участка (л. у.) представляет собой величину приведенных затрат на строительство и эксплуатацию газопровода с эквивалентным диаметром $d_i^{экв}$ [3] из труб набора $\{d_i\}$, обеспечивающего, совместно с существующим на этом л. у. d_i^{c}, суммарный эквивалентный диаметр $D_i^{экв}$, который однозначно определяется при фиксированных давлениях на концах л. у. Величина $d_i^{экв}$ определяется как

$$(d_i^{экв})^{2.6}=(D_i^{экв})^{2.6}-(d_i^{c})^{2.6}. \tag{3}$$

В связи с дискретизацией состояния, вектору $p(i)$ будет соответствовать последовательность: $d_i^{экв}=\{d_1^{экв}(i), \ldots, d_j^{экв}(i), \ldots, d_m^{экв}(i)\}$ и граф переходов $p(i-1) \to p(i)$. Выбрав политику построения варианта проектного решения л. у. [2], допустим, что с ростом $d_j^{экв}(i)$ л. у. затраты на него монотонно возрастают. Введем обозначение:

$$\frac{d_j^{экв}(i)}{d_k}=S_j(i)+r_j(i) \quad (j=1,\ 2,\ \ldots,\ m), \tag{4}$$

где d_k — величина максимального из набора диаметров $\{d_i\}$;

$S_j(i)$ — целая часть частного, представляющая собой число труб (ниток) диаметром d_k и длиной, равной длине л. у. l_i;

$r_j(i)$ — оставшаяся (дробная) часть частного.

Введем непрерывную функцию $z=\varphi(d^{экв})$, выражающую приведенные затраты на л. у. МГ единичной длины при прокладке на нем газопровода с эквивалентным диаметром $0 \leq d^{экв} \leq d_k$. В соответствии с выбранной политикой, при значениях $d^{экв}$, равных $d_1, \dots, d_k$ из $\{d_i\}$ z будет принимать последовательно значения $c_1, \dots, c_k$ из $\{c_i\}$ (при строительстве нового л. у., т. е. $d_j^{кв} = 0$, и при $S_j(i) = 0$, значения $c_1, \dots, c_k$ выбираются соответствующими первой нитке). Считая $d_1, \dots, d_k$ узлами интерполяции, функцию $z = \varphi(d^{экв})$ аналитически представим в виде интерполяционного полинома Лагранжа, т. е. на отрезке $[0, d_k]$ любому значению $d^{экв}$ поставим в соответствие определенную величину приведенных затрат $З^{лу}$. Если $d^{экв} > d_k$, т. е. имеем вариант многониточного л. у., для i-го участка имеем:

а) в случае вновь строящегося участка

$$z_{ij} = [(S_j(i) - 1)c_k + c_k^1 + З_{ij}^{лу}]\, l_i; \tag{5}$$

б) в случае реконструкции участка

$$z_{ij} = (S_j(i)c_k + З_{ij}^{лу})\, l_i, \tag{6}$$

где c_k^1 и c_k — затраты на газопровод диаметром d_k единичной длины, соответственно, для первой и последующих ниток.

Функции затрат в случае отводов (подводов) $z^{отв}$ могут быть найдены аналогично (5) и (6). Выбор оптимальных планов строительства (реконструкции) КС осуществляется направленным последовательным перебором типов и параметров КС [2]. В последующих расчетах информация о КС задается в виде семейства технико-экономических характеристик:

$$З_i^{кс} = f_i(Q_i, p(i)),$$

где Q_i — производительность КС;

$p(i)$ — вектор состояний (давлений) на входе КС;

$З_{ij}^{кс}$ — затраты на i-ую КС при давлении на входе, равном $p_j(i)$;

$$З_i^{кс} = (З_{i1}^{кс}, \dots, З_{ij}^{кс}, \dots, З_{im}^{кс}).$$

При заданном Q_i $З_i^{кс} = f_i(p(i))$.

С целью сочетаний решений отдельных участков МГ введем функцию затрат $\Phi_i(u(i), p(i))$: в случае л. у. компонентами $u(i)$ являются величины $d_j^{кв}(i)$, т. е. в случае л. у. $\Phi_{ij}(u(i), p(i)) = z_{ij}$.

Поставим задачу минимизации

$$\Phi^{мг}(U, P) = \min_{\{u(i)\}} \sum_{i=1}^{n} \Phi_i(u(i), p(i)) \tag{7}$$

при ограничениях (2).

Отличием задачи (7), (2) от задачи (1), (2) является непрерывность компонент аргумента $u(i)$ функции Φ_i в случае л. у., что сильно облегчает процесс вычисления этой функции. Минимизация (7) осуществляется методом динамического программирования с помощью рекуррентного соотношения

$$\Phi_i^{\text{мг}}(p(i)) = \min_{\{u(i)\}} \left| \Phi_i(u(i),\ p(i)) + \Phi_{i-1}^{\text{мг}}(p(i-1)) \right|, \tag{8}$$

где $\Phi_i^{\text{мг}}(p(i))$ —функция (Беллмана) минимальных суммарных затрат на i участков от начала МГ.

В результате минимизации (7), соответственно заданным ограничениям, выбирается траектория:

$$p^* = \{p_1^*, \ldots, p^*, \ldots, p_n^*\}, \tag{9}$$

т. е. значения давлений газа в узловых точках МГ, по которым минимизируется $\Phi^{\text{мг}}(U, P)$. Указанная траектория получена при допущении непрерывности значений диаметров труб на отрезке $[0, d_k]$. Чтобы уменьшить погрешность, допускаемую при определении оптимальной траектории, необходимо учесть дискретность значений диаметров сортамента труб. Для этого следует определить степень приближения δ полинома Лагранжа к кривой нормативных затрат на газопровод единичной длины с эквивалентным диаметром, равным $d^{\text{экв}}$, причем $0 \leqslant d^{\text{экв}} \leqslant d_k$. Развивая варианты, согласно политике [2], решение i-го л. у. можно рассматривать, в общем случае, как сложный многониточный л. у. с лупингами или вставками. Если представить такой л. у. как совокупность отрезков с неизменными по длине каждого отрезка эквивалентными диаметрами, тогда весь л. у. разбивается на два отрезка различной длины: l_{i1} и $l_{i2} = l_i - l_{i1}$ (если нет лупингов или вставок $l_{i2} = 0$). Эквивалентный диаметр такого сложного л. у., реализованного из труб набора $\{d_1\}$, определится так:

$$d_j^{\text{экв}}(i) = \left[l_i : \left(\frac{l_{i1}}{\left(\sum\limits_{j=1}^{S_1} d_j^{2,6}\right)^2} + \frac{l_{i2}}{\left(\sum\limits_{j=1}^{S_2} d_j^{2,6}\right)^2} \right) \right]^{-5,2}, \tag{10}$$

где S_1 и S_2 —число ниток, уложенных, соответственно, на первом и втором отрезках i-го л. у.

Затраты на такой участок определятся из выражения

$$З_j(i) = l_{i1} \sum_{j=1}^{S_1} c_j + l_{i2} \sum_{j=1}^{S_2} c_j. \tag{11}$$

Машинный эксперимент, проведенный для большого числа возможных наборов $\{d_1\}$ из труб, используемых отечественной газовой промышленностью (РТМ 1035—72), показал высокую степень приближения кривой нормативных затрат, построенной на основе (10) и (11), к интерполированной функции $z = \varphi(d^{\text{экв}})$. Наибольшая погрешность δ, которая имела место при максимальной „разреженности" $\{d_1\}$, не превышала $5 \div 7\%$. Погрешность траектории δ_p, связанная с погрешностью приближения δ, определится как

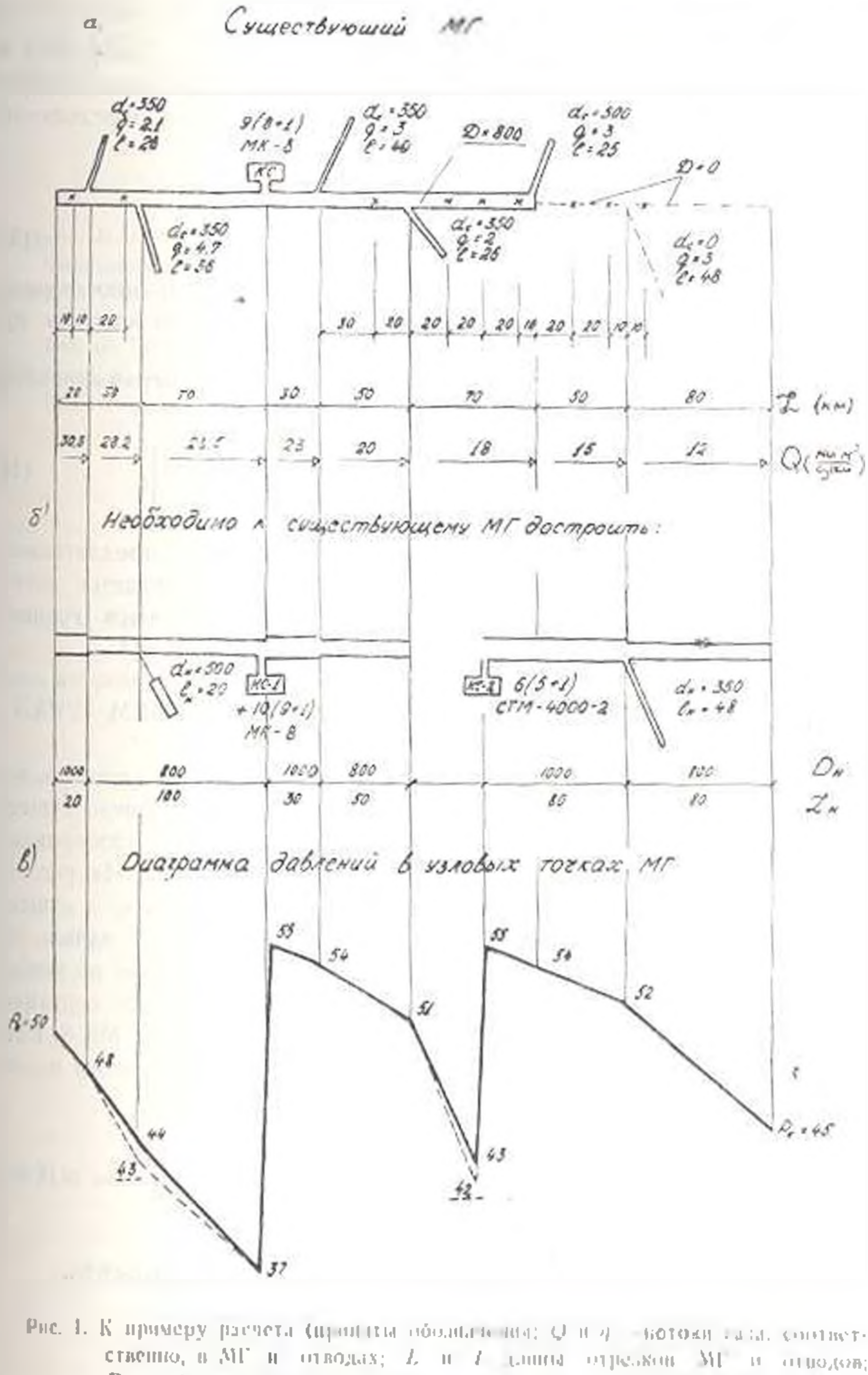

Рис. 1. К примеру расчета (приняты обозначения: Q и q — потоки газа, соответственно, в МГ и отводах; L и l — длины отрезков МГ и отводов; D_c и d_c — диаметры существующих труб МГ и отводов, $D_н$ и $d_н$ — диаметры новых труб, которые необходимо проложить на отрезках, соответственно, МГ и отводов)

$$\Delta p = (p^{max} - p^{min})\,\delta. \tag{12}$$

Таким образом, учтя допускаемую погрешность, возможно из множества выделить подмножества $\{p^*(i)\}$, по значениям которых минимизируется $З^{опт}(U, P)$. Границы подмножеств $\{p^*(i)\}$ определяются исходя из траектории (9):

$$\sup p^*(i) = p_i^* + \Delta p$$

$$\inf p^*(i) = p_i^* - \Delta p \tag{13}$$

Мощность подмножеств $\{p^*(i)\}$ значительно меньше мощности множества P, что и определяет существенный выигрыш во времени при решении задачи.

Функциональное уравнение динамического программирования для решения задачи (1), (2):

$$З_i^{опт}(p(i)) = \min_{\substack{\{u(i)\}\\ p(i) \in P(i)}} \left[З_i(u(i),\ p(i)) + З_{i-1}^{опт}(p(i-1)) \right]. \tag{14}$$

Два этапа расчета являются особенностью предлагаемого алгоритма. На первом этапе для заданного $\{d_i\}$ определяется интерполяционный полином, минимизируется (7) и формируются границы $\{p^*(i)\}$, согласно (13). На втором этапе минимизируется (1).

Программа расчета по предложенной методике составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН—IV и реализована на ЭВМ «УРАЛ—11Д».

В качестве примера приводится случай развития МГ (всего восемь участков с КС). На рис. 1,*а* сплошными линиями обозначено существующее оборудование, пунктирными—проектируемые газопроводы, крестиками—места возможного строительства новых КС. На рис. 1,*б* показано то оборудование, которое должно быть достроено к существующему, чтобы обеспечить заданные потоки. Давление в начале МГ принималось равным 50 *ата*, в конце МГ—45 *ата*. Давление на концах отводов принималось 20 *ата*. Заданными также являлись сортамент труб—350, 500, 700, 800 и 1000 *мм*, типы и параметры КС: МК-8, ГТК-10, СТМ-4000, СТМ—6000. Машинное время на решение этого примера составило 12 *мин* (вместо 35 *мин* по обычной методике).

ВНИИЭГАЗПРОМ
Ереванский комплексный отдел

Поступило 28.IX.1973.

Ն. Ս. ԽՈՒՐՇՈՒԴՈՎ

ԳԱԶԱՏԱՐ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱՅԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ամփոփում

Առաջարկվում է գազատար համակարգերի օպտիմալ պարամետրերի որոշման կատարելագործված մեթոդ, որը հիմնված է դինամիկ ծրագրավորման ապարատի օգտագործման վրա։

Միջանկյալ օպտիմալ հայտանիշի մեծացումը բերում է մեքենայական ժամանակի կորստի իջեցում։ Բերված են տվյալներ առաջարկված ալգորիթմն իրագործող FORTRAN ծրագրի մասին։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сухарев М. Г., Ставровский Е. Р.* Расчеты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. Изд. «Недра», М., 1971.
2. *Кудрина Л. Б., Бидулина Л. М.* Определение оптимальных технических решений системы линейных магистральных газопроводов при стационарном течении газа. Реф. сб. ЭО ВНИИЭгазпрома, № 4, 1968.
3. *Волоский Э. А., Константинова И. М.* Режим работы магистральных газопроводов. Изд. «Недра», Ленинград, 1970.