

УДК 696.2:622.691.4

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СЕТЕЙ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ

канд. техн. наук А.Я. САВАСТИЁНОК

*В соответствии с математической моделью разработана программа гидравлического расчета распределительных газовых сетей низкого давления, учитывающая материал участка газопровода, способ прокладки участка газопровода, его глубину заложения, перспективу развития газовой сети. Программа применима для сетей любой трассировки и проводит оптимизацию по критерию дисконтированных затрат.*

**Введение.** В настоящее время существует несколько методик гидравлического расчета, применение которых дает различные результаты. Методики отличаются принципом первоначального расчетного потокораспределения и принципом распределения расчетного перепада давления в направлении. В то же время существуют требования, которым не удовлетворяет ни одна из существующих методик: стандартные значения диаметров в кольцевых сетях подбираются таким образом, что на этапе гидравлической увязки колец происходит существенное изменение потокораспределения по отношению к расчетному; в методиках не учитываются особенности проектирования комбинированных газовых сетей, состоящих как из стальных, так и полиэтиленовых газопроводов [1].

Оптимизация распределительных газовых сетей возможна на всех трех этапах проектирования: выбора типа системы (природный или сжиженный газ, количество ступеней давления); выбор структуры системы (количество ГРП, трассировка); параметрическая оптимизация системы газоснабжения, основой которой является гидравлический расчет газовых сетей. Данная работа относится к этапу параметрической оптимизации.

**Структурная схема методики гидравлического расчета.** Как правило, любой объект исследования можно представить в виде «черного ящика» с определенным количеством входов и выходов [2]. При этом структурная схема гидравлического расчета газовой сети как предмета исследования выглядит следующим образом:

- входными контролируемыми и управляемыми факторами являются: первоначальное потокораспределение в сети, способ подбора стандартных значений диаметров, принцип распределения расчетного перепада давления, расчетный перепад давления в сети, материал газопровода, сортамент (количество типоразмеров) диаметров трубопроводов;
- входными контролируемыми, но неуправляемыми факторами являются: путевые расходы участков, длины участков, трассировка сети, продолжительность строительства;
- неуправляемыми и неконтролируемыми факторами являются: ошибки измерительных приборов или методов анализа, изменение свойств вследствие старения или износа установок, влияние обслуживающего персонала и т.д.;
- выходными факторами являются: диаметры участков газопроводов, располагаемое давление у потребителей, значение параметра оптимизации.

Существующие методики в качестве параметра оптимизации используют материальную характеристику системы газоснабжения (сумму произведений диаметров участков на их длины) [4 – 6]. Этот параметр оптимизации неприменим в случаях, когда сеть состоит как из стальных, так и полиэтиленовых газопроводов, если различна глубина заложения участков сети, если сеть строится в несколько этапов, и он не учитывает изменение толщины стенки трубопровода с увеличением диаметра. Поэтому необходимо подобрать такой параметр оптимизации, который учитывал бы все указанные особенности.

В рыночной экономике целесообразность инвестирования проекта определяется с использованием следующих критериев: чистой дисконтированной стоимости, внутреннего уровня доходности, дисконтного срока окупаемости, индекса доходности [7]. Эти критерии определяются сопоставлением дисконтированного дохода и дисконтированных затрат. Особенностью газовых сетей является то, что доходы пропорциональны объему газоснабжения, а когда доход фиксирован, упомянутые критерии достигают оптимального значения при минимуме дисконтированных затрат

$$ДЗ = \sum_{t=1}^T \frac{K_t + C_t}{(1 + E)^t}, \quad (1)$$

где  $K_t$ ,  $C_t$  – капитальные и эксплуатационные затраты на строительство участков сети за период строительства  $t$ , руб.;

$E$  – коэффициент дисконтирования;

$T$  – продолжительность строительства сети.

**Условие распределения расчетного перепада давления по участкам сети.** Для оптимизации распределения расчетного перепада давления по критерию дисконтированных затрат целевую функцию удобно представить следующим образом:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n ДЗ_i = \sum_{i=1}^n C_{ii}^M d_i l_i, \quad (2)$$

где  $C_{ii}^M$  – дисконтированные затраты в долях от материальной характеристики для участка сети, руб./мм·м;  
 $d_i$  – диаметр участка сети, мм;  
 $l_i$  – длина участка сети, м.

После оптимизации целевой функции методом Лагранжа [4] получено условие экономичности, сформулированное в виде узлового уравнения:

$$\sum_{i=1}^{n_y} \frac{\text{sgn}(V_i) C_{ii}^M V_i^{\alpha/\beta} l_i^{(1+\beta)\beta}}{(P_{ni}^r - P_{ki}^r)^{(1+\beta)\beta}} = 0, \quad (3)$$

где  $n_y$  – количество участков, входящих в узел и выходящих из узла;

$\text{sgn}(V_i)$  равен +1 для расхода, входящего в узел, и –1 – для выходящего из узла;

$\alpha, \beta, r$  – показатели степени, зависящие от давления газа в сети;

$V_i$  – расчетный расход газа на участке сети, м<sup>3</sup>/ч;

$P_{ni}, P_{ki}^r$  – давление в начале и в конце участка, Па.

Для определения величины  $C_{ii}^M$  необходимо определить стоимость строительства участков газовых сетей при различных условиях (материале участка газопровода, способе прокладки участка газопровода, его глубине заложения, перспективе развития газовой сети).

Капитальные затраты  $K$  строительства состоят из прямых затрат, накладных расходов, плановых накоплений, лимитированных и других затрат и в соответствии с Методическими указаниями по определению стоимости строительства в Республике Беларусь определяются по формуле

$$K = 1,01 \cdot 1,06 [M + 4,98(ЗП + ЭМ)], \quad (4)$$

где  $M$  – затраты на материальные ресурсы, руб.;

$ЭМ$  – затраты на эксплуатацию машин, руб.;

$ЗП$  – заработная плата рабочих, руб.

**Первоначальное потокораспределение в сети.** Как указано в [8], «в соответствии с принципами методологической декомпозиции задача проектирования решается в три этапа: предварительное потокораспределение, параметрическая оптимизация и точное потокораспределение». Без предварительного потокораспределения невозможно увязать сеть по условию (3), чтобы на основании полученных значений перепадов давлений по участкам определить расчетные значения диаметров. При переходе от расчетных значений диаметров к стандартным в сети устанавливается окончательное потокораспределение.

При выбранном направлении движения газа расчетные значения расходов газа для участков определяются по формуле

$$V_{узн} = \sum_{i=1}^{n_y} V_i, \quad (5)$$

где  $V_{узн}$  – узловой расход газа, м<sup>3</sup>/ч.

Если узел имеет более одного подводящего участка, то количество неизвестных больше количества уравнений и для однозначного решения необходимы дополнительные условия. В качестве дополнительных условий принят минимум материальной характеристики системы при определенном значении надежности газоснабжения.



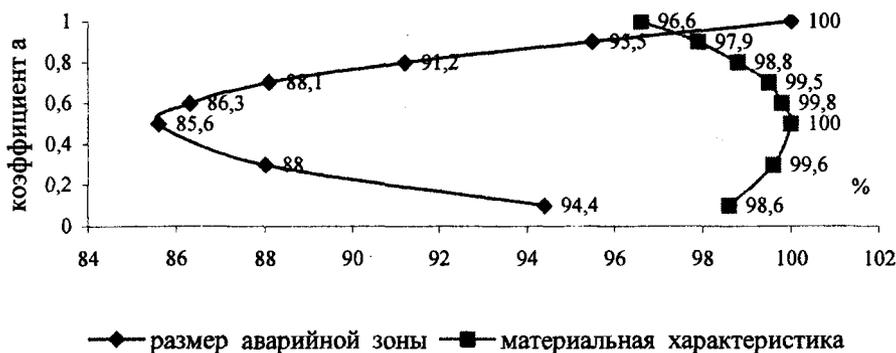


Рис. 2. Влияние потокораспределения на материальную характеристику газовой сети и величину вероятной аварийной зоны, %

Однако при проектировании газовых сетей при потокораспределении по наиболее экономичной схеме 1 + 0 в результате перехода к стандартным значениям диаметров участков при гидравлической увязке колец может оказаться, что поправочный расход вычитается из минимально допустимого расчетного значения расхода газа для участка, а это явилось бы ошибкой на стадии проектирования. Поэтому в качестве варианта потокораспределения, обеспечивающего минимум материалоемкости системы при допустимом уровне надежности газоснабжения, следует признать вариант 0,9 + 0,1. В общем виде такой вариант описывается уравнением

$$V_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{n_g - 1}{10}\right)V_{mp} + 0,5V_{ni} \text{ при } l_i < l_{i\min} \\ 0,1V_{mp} + 0,5V_{ni} \text{ при } l_i \geq l_{i\min} \end{cases}, \tag{7}$$

где  $n_g$  – количество участков, входящих в узел;

$V_{mp}$  – транзитный расход газа на участках, входящих в узел, м<sup>3</sup>/ч;

$V_{ni}$  – путевой расход газа на участке, м<sup>3</sup>/ч.

При неправильной трассировке сети необходимо сравнивать длины направлений, по которым движется газ от ГРП до узла, имеющего более одного подводящего участка.

**Способ подбора стандартных значений диаметров.** Применение существующих методов подбора стандартных значений диаметров [1, 6, 9] не гарантирует сохранения потокораспределения при гидравлической увязке колец сети. Новому потокораспределению согласно условию экономичности (3) соответствуют новые значения расчетных перепадов давлений. Поэтому если на этапе гидравлической увязки сети происходит существенное изменение потокораспределения, это означает, что проектирование происходит с игнорированием условия экономичности.

Гидравлическую увязку колец можно производить, если известны значения стандартных диаметров для всех участков кольца. Такой вариант возможен, если производить подбор стандартных диаметров не по направлениям, а от узла к узлу. Когда участки, входящие в узел, замыкают кольцо, можно производить гидравлическую увязку кольца с учетом стандартных диаметров участков кольца. Критерием подбора диаметра является минимальная разность между расчетным перепадом давления на участке (в кольце) и перепадом давления при стандартных значениях диаметров.

При проведении увязки по формуле Лобачева – Кросса (8) увязку всех колец сети с известными диаметрами нужно проводить каждый раз при подборе диаметров участков нового кольца. Изменение расчетного расхода вследствие увязки кольца, включающего один из головных участков сети, потребует переувязки практически всех колец сети. При этом может потребоваться изменение стандартных значений диаметров, принятых ранее (что свидетельствует об изменении расчетного потокораспределения).

Вариантом, требующим значительно меньшего количества вычислений, является учет увязки колец сети по формуле (9).

Окончательное потокораспределение в сети определяется на этапе гидравлической увязки колец по формуле (8) после подбора стандартных значений диаметров.

$$\Delta V_c = - \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \text{sgn}(P_{ni}^r - P_{ki}^r) \cdot (P_{ni}^r - P_{ki}^r)}{\alpha \sum_{i=1}^{n_k} \frac{(P_{ni}^r - P_{ki}^r)}{V_i}}, \quad (8)$$

где  $n_k$  – количество участков, образующих кольцо;

$\text{sgn}(P_{ni}^r - P_{ki}^r)$  равен «+1» при движении газа на участке по часовой стрелке и «-1» при движении газа на участке против часовой стрелки.

При расчетных перепадах давления в обоих направлениях кольца сумма перепадов давлений участков одинакова и равна перепаду давления в кольце. При присвоении участкам кольца стандартных значений диаметров в обоих направлениях при расчетных значениях расходов получаются разные суммы перепадов давлений по участкам. Следствием второго закона Кирхгофа для кольца сети является то, что перепад давления в кольце равен полусумме перепадов давлений по полукольцам.

Последовательность присвоения участкам сети стандартных диаметров по принципу «от узла к узлу» имеет следующий вид. Расчет идет от узла к узлу, начиная с нулевых точек. Для каждого узла значения диаметров присваиваются всем входящим в узел участкам. При этом узел не рассчитывается, если не подобраны диаметры участков, выходящих из него. Для любого участка  $a - b$  подбирается такой диаметр, чтобы сумма  $\Delta p_{a-b}'' + \Delta p_b'$  имела минимальное по модулю значение. Если участки узлов замыкают кольцо, то невязка вершины кольца определяется по формуле

$$\Delta p_a' = \frac{\Delta p_{a-b}'' + \Delta p_b' + \Delta p_{a-c}'' + \Delta p_c'}{2}, \quad (9)$$

$$\Delta p_{a-b}'' = \Delta p_{\hat{a}-b} - \Delta p_{pa-b},$$

где  $\Delta p_{pa-b}$  – перепад давления на участке  $a - b$  при расчетном значении расхода газа и расчетном значении диаметра;

$\Delta p_{\hat{a}-b}$  – перепад давления на участке при расчетном значении расхода газа и стандартном значении диаметра.

Если узел является вершиной нескольких колец, то невязка узла определяется по формуле

$$\Delta p_a' = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i'}{n}. \quad (10)$$

Диаметр участка, ближайшего к ГРП, подбирается в последнюю очередь.

Предлагаемый новый способ подбора стандартных значений диаметров позволяет подбирать стандартные значения диаметров таким образом, что на этапе гидравлической увязки колец не происходит существенного изменения расчетного потокораспределения в сети.

При проектировании тупиковых разветвленных сетей данный способ подбора стандартных значений диаметров приводит к тем же результатам, если сравнивать с обычными способами. Таким образом, данный способ обладает универсальностью и дает экономический эффект при проектировании кольцевых и частично закольцованных газовых сетей.

**Математическая модель гидравлического расчета распределительных газовых сетей.** Математическая модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнения определения падения давления в газопроводе (11), уравнения предварительного потокораспределения (7), условия экономичности (3) и увязки узлов сети по этому условию (12), ограничений в виде уравнений Кирхгофа (13), (14) и условия технологичности (15), уравнения подбора стандартных значений диаметров (9) и увязки колец сети (8).

Кроме этого, модель включает в себя матрицу соединений  $\bar{A}$ , матрицу контуров  $\bar{B}$  и матрицу направлений  $\bar{C}$ , которые позволяют математически представлять трассировку сети:

$$P_n^2 - P_k^2 = 1,62\lambda \frac{V_0^2}{d^5} \rho_0 P_0 l; \quad (11)$$

$$\Delta(P_{ni}^r - P_{ki}^r) = \frac{\sum_{i=1}^{n_y} \operatorname{sgn}(V_i) C_{ii}^M V_i^{\alpha/\beta} l_i^{(1+\beta)/\beta} (P_{ni}^r - P_{ki}^r)^{-(1+\beta)/\beta}}{\frac{1+\beta}{\beta} \sum_{i=1}^{n_y} C_{ii}^M V_i^{\alpha/\beta} l_i^{(1+\beta)/\beta} (P_{ni}^r - P_{ki}^r)^{-(1+2\beta)/\beta}}; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_y} \operatorname{sgn}(V_i) \cdot V_i = V_i^{y_{zn}}. \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} \operatorname{sgn}(P_{ni}^r - P_{ki}^r) \cdot (P_{ni}^r - P_{ki}^r) = 0; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{n_y} (P_{ni}^r - P_{ki}^r) \leq \Delta P_p. \quad (15)$$

После увязки газовой сети по условию экономичности (3) с помощью формулы (12) для газовой сети справедлива система уравнений:

$$\begin{aligned} \bar{A} \cdot \frac{C_{ii}^M V_i^{\alpha/\beta} l_i^{(1+\beta)/\beta}}{(P_{ni}^r - P_{ki}^r)^{(1+\beta)/\beta}} &= 0; \quad \bar{A} \cdot V_i = V_i^{y_{zn}}; \\ \bar{B} \cdot (P_{ni}^r - P_{ki}^r) &= 0; \quad \bar{C} \cdot (P_{ni}^r - P_{ki}^r) = (P_n^r - P_k^r). \end{aligned} \quad (16)$$

В методике приняты следующие допущения:

- в качестве режима движения газа для сетей низкого давления принят режим гидравлической гладкости;
- расчетный расход газа на участке не зависит от соотношения транзитного и путевого расхода и принимается равным сумме транзитного и половины путевого расхода;
- потери давления в местных сопротивлениях учитываются посредством коэффициента местных потерь давления, постоянного для всех участков сети.

Расчеты, проведенные без принятых в методике допущений, показали, что все потребители получают газ с предусмотренными значениями расхода и располагаемого давления. Это позволяет сделать вывод, что допущения не влияют на достижение цели гидравлического расчета.

Анализ факторов, не зависящих от методики расчета, показывает, что наибольшая экономия соответствует увеличению располагаемого перепада давления в сети с 800 до 1200 Па (до 11 %) и использованию всего сортамента диаметров труб (до 4 %). Остальные факторы вносят примерно одинаковый вклад в сокращение материальной характеристики (1 – 2 %). Из существующих методик наиболее экономичной является методика, предложенная А.М. Левиным [4, 5].

Также сопоставлены результаты расчетов по программе, используемой в ПРУП «Белгипрогаз», и по разработанной программе при одинаковом объеме газоснабжения, трассировке сети, располагаемом давлении и количестве типоразмеров диаметров трубопроводов.

Для стальной сети поселка Дроздово по материальной характеристике сокращение по системе составляет 8,6 %, а по массе труб – 11,3 %. Для стальной сети деревни Бровка по материальной характеристике сокращение по системе составляет 4,2 %, а по массе труб – 5,5 %.

Для комбинированной сети поселка Дроздово экономия дисконтированных затрат составляет 13256 руб. в ценах 1991 года, что составляет 3,7 %. Для комбинированной сети деревни Бровка экономия дисконтированных затрат составляет 4383 руб., или 1,86 %.

Сопоставление стальных и комбинированных газовых сетей показывает, что применение полиэтиленовых газопроводов позволяет снижать затраты на строительство и эксплуатацию газовых сетей до 11 %.

### Заключение

1. Даны рекомендации по уровням факторов, не зависящих от методики расчета и влияющих на стоимость строительства и эксплуатации газовых сетей:

- показано, что к снижению массы трубопроводов газовой сети до 4 % приводит использование всего сортамента стальных трубопроводов, выпускаемого промышленностью;
- использование полиэтиленовых газопроводов позволяет снижать стоимость сети до 11 %.

2. Разработаны новые уровни факторов, зависящих от методики расчета и влияющих на стоимость строительства и эксплуатации газовых сетей:

- новое экономичное условие распределения располагаемого перепада давления по участкам газовых сетей, производящее оптимизацию по критерию дисконтированных затрат, учитывающее современный уровень эксплуатационных и капитальных затрат;
- при заданных направлениях движения газа оптимальный, с точки зрения надежности и материальной характеристики сети, вариант первоначального потокораспределения;
- новый способ подбора стандартных значений диаметров, учитывающий гидравлическую увязку колец сети и не изменяющий потокораспределение в сети на этапе гидравлической увязки колец, что позволяет использовать условие экономичности в полной мере.

3. Разработана программа гидравлического расчета распределительных газовых сетей низкого давления. По сравнению с существующей программой гидравлического расчета газовых сетей, производящей оптимизацию по критерию материальной характеристики, при расчете стальных сетей сокращение массы сети составляет до 11 %. При расчете комбинированных сетей, состоящих как из стальных, так и из полиэтиленовых газопроводов, сокращение дисконтированных затрат составляет до 4 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ионин А.А. Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.
2. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. – Мн.: БГУ, 1982. – 302 с.
3. Куприянов М.С. Рациональные системы газоснабжения городов. – М.: Стройиздат, 1971. – 144 с.
4. Левин А.М. Системы газоснабжения городов и населенных пунктов – Мн.: БПИ, 1990. – 74 с.
5. Левин А.М., Смирнов В.А., Черкасова А.Я. Расчёт газовых сетей на минимум металла // Газовая промышленность. – 1966. – № 9 – С. 14 – 16.
6. Ляуконис А.Ю. Оптимизация городских систем газоснабжения в вероятностно-неопределённых условиях. – Вильнюс: Минтис, 1983. – 295 с.
7. Падалко Л.П. Экономические критерии в задачах совершенствования и развития энергетики // Энергетика – Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 1997. – № 9 – 10. – С. 69 – 75.
8. Панов М.Я., Квасов И.С., Круглякова В.М. Оптимизация гидравлических сетевых систем при решении задач проектирования // Энергетика – Известия вузов. – 1997. – № 9 – 10. – С. 81 – 84.
9. Стратан Ф.И., Иродов В.Ф. Методы оптимизации при проектировании систем теплогазоснабжения. – Кишинёв: Штиинца, 1984. – 74 с.