

ВЫВОД

Проведен анализ методик определения теплофизических характеристик материалов со специальными свойствами. Разработаны оптимальные методики, выбраны аппаратурные средства измерения температуры изучаемых образцов из многослойных материалов в камере лучистой обработки для индикации и контроля тепловых режимов сушки при обработке материалов концентрированными потоками энергии.

Полученные результаты позволяют проводить оптимизацию рабочих характеристик и управлять процессами термообработки при получении новых композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е с ь м а н, Р. И. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах / Р. И. Есьман, В. Ф. Шевцов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 5. – С. 62–67.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 10.11.2006

УДК 696.2:622.691.4.07

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ МЕТОДИКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Канд. техн. наук САВАСТИЕНОК А. Я.

*УО «Государственный институт повышения квалификации
и переподготовки кадров в области газоснабжения “Газ-институт”»*

Ресурсосбережение – одна из важных задач, не теряющая актуальности. В статье предлагается методика гидравлического расчета, позволяющая при определенных условиях сокращать затраты на строительство распределительных газопроводов до 10 %.

В настоящее время существуют несколько методик гидравлического расчета, применение которых дает различные результаты. Методики отличаются принципами первоначального расчетного потокораспределения и 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 из полиэтиленовых газопроводов.

Оптимизация распределительных газовых сетей возможна на всех трех этапах проектирования: при выборе типа системы (природный или сжиженный газ, количество ступеней давления); при выборе структуры системы (количество ГРП, трассировка); в процессе параметрической оптимизации системы газоснабжения, основой которой является гидравлический расчет газовых сетей.

Как правило, любой объект исследования можно представить в виде «черного ящика» с определенным количеством входов и выходов [1]. При этом структурная схема гидравлического расчета газовой сети как предмета исследования выглядит следующим образом:

1) 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, сортament (количество типоразмеров) диаметров трубопроводов;

2) входные контролируемые, но неуправляемые факторы – путевые расходы участков, их длина, трассировка сети, продолжительность строительства;

3) неуправляемыми и неконтролируемыми факторами являются ошибки измерительных приборов или методов анализа, изменение свойств вследствие старения или износа установок, влияние обслуживающего персонала и т. д.;

4) выходные факторы – диаметры участков газопроводов, располагаемое давление у потребителей, значение параметра оптимизации.

Существующие методики в качестве параметра оптимизации используют материальную характеристику системы газоснабжения [2–4]. Этот параметр оптимизации неприменим в тех 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.

В рыночной экономике целесообразность инвестирования проекта определяется с использованием следующих критериев: чистой дисконтированной стоимости, внутреннего уровня доходности, дисконтного срока окупаемости, индекса доходности [5]. 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 , р.; E – коэффициент дисконтирования; T – продолжительность строительства сети.

Для оптимизации распределения расчетного перепада давления по критерию дисконтированных затрат целевую функцию удобно представить следующим образом:

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

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

После оптимизации целевой функции методом Лагранжа [2] получено условие экономичности, сформулированное в виде узлового уравнения:

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

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; α, β, r – показатели степени, зависящие от давления газа в сети; V_i – расчетный расход газа на участке сети, м³/ч; ρ_{ni}^r, ρ_{ki}^r – давление в начале и в конце участка, Па.

Для определения величины C_{it}^M необходимо определить стоимость строительства участков газовых сетей при различных условиях (материал участка газопровода, способ прокладки участка газопровода, его глубина заложения, перспектива 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

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

где M – затраты на материальные ресурсы, р.; ЭМ – затраты на эксплуатацию машин, р.; ЗП – заработная плата рабочих, р.

При проектировании с учетом аварийных режимов газоснабжения газопроводы целесообразно рассчитывать из условия постоянства диаметров. При этом обеспечивается та же надежность газоснабжения при меньшем резерве давления и соответственно при меньших вложениях на строительство.

Как указано в [6], 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

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

где $V_{\text{узн}}$ – узловой расход газа, м³/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.

Для установления надежности сети необходимо знать ее диаметры, что является целью гидравлического расчета, поэтому в общем виде решить данную задачу невозможно.

Газовые сети обладают следующей особенностью; уровень фактора, обеспечивающий минимальные затраты для одной сети, обеспечивает также минимальные затраты и для любой другой сети при возможности его применения, определяемой контролируемыми и неуправляемыми факторами. Поэтому надежность вариантов потокораспределения устанавливается на упрощенном примере газовой сети (рис. 1) по критерию вероятного недоотпуска газа [7]

$$V_n = \sum_{i=1}^n q_i \Delta V_{\text{ав}i}, \quad (6)$$

где V_n – вероятный недоотпуск газа, м³/ч; q_i – вероятность аварии на участке; $\Delta V_{\text{ав}i}$ – недоотпуск газа в систему газоснабжения в результате отключения поврежденного участка, м³/ч.

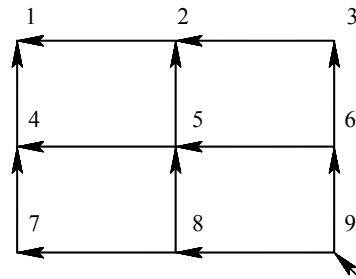


Рис. 1. Кольцевая сеть газоснабжения

Для узла 2 (рис. 1) уравнение (5) имеет вид

$$V_{p2-1} + V_{\text{узн}2} = V_{p3-2} + V_{p5-2}.$$

Пусть

$$V_{p3-2} = V_{\text{тр}} b + \frac{1}{2} V_{n3-2}; \quad V_{p5-2} = V_{\text{тр}} a + \frac{1}{2} V_{n5-2},$$

где $\frac{1}{2} V_{ni}$ – минимальное расчетное значение расхода газа для участка, равное половине его путевой нагрузки, м³/ч; $V_{\text{тр}} a$ – количество транзитного

газа, присваиваемого участку с меньшей длиной, $m^3/ч$; $V_{тр}b$ – количество транзитного газа, присваиваемого участку с большей длиной, $m^3/ч$.

Коэффициенты a и b изменяются от 1 до 0, причем $a + b = 1$. Например, если $a = 0$, то это означает, что по участку с меньшей длиной идет минимально допустимое количество газа. Таким образом, при определенных значениях коэффициентов a и b уравнение (5) имеет однозначное решение.

Всего рассматривалось 10 аварийных режимов для каждого из семи вариантов потокораспределения.

При вероятном недоотпуске газа при потокораспределении (1 + 0), принятом за 100 %, зависимость вероятного аварийного недоотпуска газа и материальной характеристики системы газоснабжения от варианта потокораспределения имеет вид, представленный на рис. 2.

При этом показатели надежности газоснабжения, рассчитанные по разным формулам для различных вариантов потокораспределения, при округлении до сотых дают одинаковый результат. Эти значения показателя надежности удовлетворяют требованиям для сетей среднего и высокого давлений, и тем более требованиям, предъявляемым к сетям низкого давления.

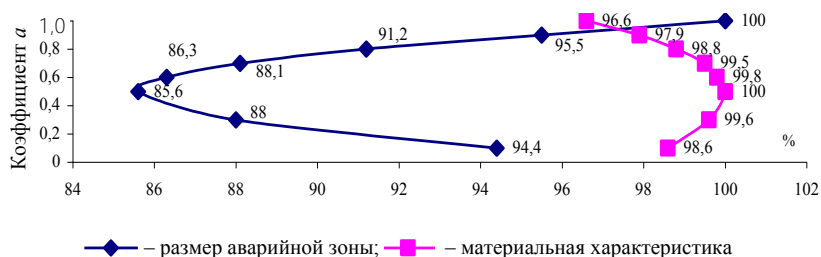


Рис. 2. Влияние потокораспределения на материальную характеристику газовой сети и величину вероятной аварийной зоны, %

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

$$V_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{n_b - 1}{10}\right) V_{тр} + 0,5 V_{пi} & \text{при } l_i < l_{i\min}; \\ 0,1 V_{тр} + 0,5 V_{пi} & \text{при } l_i \geq l_{i\min}, \end{cases} \quad (7)$$

где n_b – количество участков, входящих в узел; $V_{тр}$ – транзитный расход газа на участках, входящих в узел, $m^3/ч$; $V_{пi}$ – путевой расход газа на участке, $m^3/ч$.

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

Применение существующих методов подбора стандартных значений диаметров [4, 8, 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 при условии известных значений 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. При проведении увязки по формуле Лобачева – Кросса увязку кольца нужно производить столько раз, сколько общих участков с другими кольцами оно имеет, что очень трудоемко даже для ЭВМ. Поэтому нецелесообразно учитывать гидравлическую увязку колец на стадии присвоения диаметрам стандартных значений по формуле

$$\Delta V_c = - \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \operatorname{sgn}(p_{ni}^f - p_{ki}^f)(p_{ni}^f - p_{ki}^f)}{\alpha \sum_{i=1}^{n_k} \frac{p_{ni}^f - p_{ki}^f}{V_i}}, \quad (8)$$

где n_k – количество участков, образующих кольцо; $\operatorname{sgn}(p_{ni}^f - p_{ki}^f)$ 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 равенство перепада давления в кольце 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:

$$\Delta p'_a = \frac{\Delta p''_{a-b} + \Delta p'_b + \Delta p''_{a-c} + \Delta p'_c}{2}; \quad (9)$$

$$\Delta p'_{a-b} = \Delta p_{\partial a-b} - \Delta p_{pa-b},$$

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

$$\Delta p'_a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p'_i}{n}. \quad (10)$$

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

При проектировании тупиковых разветвленных сетей данный способ подбора стандартных значений диаметров приводит к тем же результатам, что и при обычных способах. Таким образом, данный способ обладает универсальностью и дает экономический эффект при проектировании кольцевых и частично закольцованных газовых сетей.

Математическая модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнения определения падения давления в газопроводе, уравнения предварительного потокораспределения, условия экономичности и увязки узлов сети по этому условию, ограничений в виде уравнений Кирхгофа и условия технологичности, уравнения подбора стандартных значений диаметров и увязки колец сети. 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:

$$p_H^2 - p_K^2 = 1,62\lambda \frac{V_0^2}{d^5} \rho_0 p_0 l; \quad (11)$$

$$\Delta(p_{Hi}^r - p_{Ki}^r) = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \text{sgn}(V_i) C_{it}^m V_i^{\alpha/\beta} l_i^{1+\beta/\beta} (p_{Hi}^r - p_{Ki}^r)^{-1+\beta/\beta}}{\frac{1+\beta}{\beta} \sum_{i=1}^{n_j} C_{it}^m V_i^{\alpha/\beta} l_i^{1+\beta/\beta} (p_{Hi}^r - p_{Ki}^r)^{-1+2\beta/\beta}}; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j} \text{sgn}(V_i) V_i = V_{узл i}; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} \text{sgn} \left(p_{Hi}^r - p_{Ki}^r \right) p_{Hi}^r - p_{Ki}^r = 0; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{n_n} p_{Hi}^r - p_{Ki}^r \leq \Delta p_p. \quad (15)$$

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

$$\begin{cases} \bar{A} \frac{C_{it}^m V_i^{\alpha/\beta} J_i^{1+\beta/\beta}}{(\rho_{ni}^f - \rho_{ki}^f)^{1+\beta/\beta}} = 0; & \bar{A} V_i = V_{узл.i}; \\ \bar{B}(\rho_{ni}^f - \rho_{ki}^f) = 0; & \bar{C}(\rho_{ni}^f - \rho_{ki}^f) = \rho_n^f - \rho_k^f. \end{cases} \quad (16)$$

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; потери давления в местных сопротивлениях учитываются посредством коэффициента местных потерь давления, постоянного для всех участков сети.

Расчеты, проведенные без принятых в методике упрощений, показали, что все потребители получают газ с предусмотренными значениями расхода и располагаемого давления. Это позволяет сделать вывод о том, что упрощения 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 от 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 А. М. Левина [2, 3].

Также сопоставлены результаты расчетов по программе Hydra и разработанной программе при одинаковом объеме газоснабжения, трассировке сети, располагаемом давлении и количестве типоразмеров диаметров трубопроводов.

Для стальной сети поселка Дроздово сокращение по массе труб составляет 11,3 %. Для стальной сети деревни Бровка сокращение по массе труб составляет 5,5 %. Накладные расходы и плановые накопления не зависят от диаметров газопроводов (4), поэтому сокращение общей стоимости строительства будет меньше.

Для комбинированной сети поселка Дроздово экономия дисконтированных затрат составляет 13256 р. в ценах 1991 г., что составляет 3,7 %. Для комбинированной сети деревни Бровка экономия дисконтированных затрат составляет 4383 р., 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 %.

ВЫВОДЫ

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;

- применение полиэтиленовых газопроводов позволяет снижать стоимость сети до 11%;

- при проектировании с учетом аварийных режимов газоснабжения газопроводы целесообразно рассчитывать из условия постоянства диаметра.

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. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

2. Левин, А. М. Системы газоснабжения городов и населенных пунктов / А. М. Левин. – Минск: БПИ, 1990. – 74 с.

3. Левин, А. М. Расчет газовых сетей на минимум металла / А. М. Левин, В. А. Смирнов, А. Я. Черкасова // Газовая промышленность. – 1966. – № 9. – С. 14–16.

4. Ляуконис, А. Ю. Оптимизация городских систем газоснабжения в вероятностно-неопределенных условиях / А. Ю. Ляуконис. – Вильнюс: Минтис, 1983. – 295 с.

5. Падалко, Л. П. Экономические критерии в задачах совершенствования и развития энергетики / Л. П. Падалко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1997. – № 9–10. – С. 69–75.

6. Панов, М. Я. Оптимизация гидравлических сетевых систем при решении задач проектирования / М. Я. Панов, И. С. Квасов, В. М. Круглякова // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1997. – № 9–10. – С. 81–84.

7. Куприянов, М. С. Рациональные системы газоснабжения городов / М. С. Куприянов. – М.: Стройиздат, 1971. – 144 с.

8. Ионин, А. А. Газоснабжение / А. А. Ионин. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.

9. Стратан, Ф. И. Методы оптимизации при проектировании систем теплогазоснабжения / Ф. И. Стратан, В. Ф. Иродов. – Кишинев: ШТИИИИЦА, 1984. – 74 с.

Представлена кафедрой
газоснабжения

Поступила 28.12.2006