

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Канд. техн. наук САВАСТИЕНОК А. Я.

*УО «Государственный институт повышения квалификации
и переподготовки кадров в области газоснабжения "Таз-институт"»*

Снижение стоимости строительства — актуальная задача настоящего времени. Одна из составляющих стоимости — затраты на строительство и эксплуатацию инженерных сетей, обеспечивающих функциональное назначение зданий. В статье предлагается методика гидравлического расчета трубопроводных инженерных сетей, позволяющая сократить их стоимость на этапе проектирования до 5 % при обеспечении тех же технологических параметров и надежности.

На примере оптимизации гидравлического расчета распределительных газопроводов [1] показано, что сокращение массы стальной сети составляет до 11 %, снижение стоимости строительства комбинированных сетей, состоящих из стальных и полиэтиленовых газопроводов, — до 4 %. Величина экономического эффекта зависит от факторов, зависящих и не зависящих от методики расчета. Факторами, влияющими на стоимость газовых сетей и зависящими от методики расчета, являются: принцип распределения расчетного перепада давления в направлении; способ перехода от расчетных значений диаметров к стандартным; потокораспределение в сети при определенной трассировке сети; пропускная способность газопроводов; характеристика способа прокладки газопровода и этапность строительства. Факторами, влияющими на стоимость газовых сетей и не зависящими от методики расчета, являются: путевые расходы участков, трассировка сети, длина участков, продолжительность строительства.

Как газовые сети, так и системы отопления и горячего водоснабжения могут выполняться комбинированными, т. е. состоящими из стальных или полимерных (полиэтиленовых) трубопроводов. При этом различают внутренние газопроводы и наружные.

Сопоставление методик по другим признакам сведено в табл. 1.

Внутренние газопроводы, как правило, тупиковые, в то время как системы отопления и горячего водоснабжения обычно кольцевые. Это значит, что принципы проектирования наружных кольцевых систем газоснабжения можно использовать для расчета внутренних кольцевых водяных сетей.

Особенностью трассировки систем отопления и горячего водоснабжения является то, что у теплоносителя нет резервного пути движения за счет транзитного расхода, как у газа в кольцевых газовых сетях. Внутренние газопроводы и системы холодного водоснабжения полностью идентичны по трассировке.

В сетях газоснабжения известен располагаемый перепад давления, в то время как при проектировании тепловых сетей подбираются сетевые насосы. Это значит, что при оптимизации тепловых сетей необходимо учиты-

вать стоимость установки и эксплуатации насоса с учетом развиваемого им перепада давления. Чем больше стоимость насоса, тем больший перепад давления он развивает и тем меньше затраты на тепловую сеть (за счет снижения диаметров). Максимальное значение развиваемого напора определяется условием механической прочности трубопроводов.

Таблица 1

Гидравлический расчет трубопроводных инженерных сетей

	Газовые сети	Тепловые сети	Системы отопления	Горячее водоснабжение
Классификация по конфигурации	Тупиковые, кольцевые, смешанные	Тупиковые, кольцевые, смешанные	Двухтрубные, однострунные, горизонтальные, вертикальные, с верхней разводкой, с нижней разводкой	Посекционно за- кольцованные стоя- ки. Закольцованные стояки. Без циркуляционных стояков (включая холодное водоснабжение). С верхней развод- кой. С нижней разводкой.
Определение расчетных рас- ходов	В зависимости от годовой потреб- ности потребителя в теплоте или от количества прибо- ров	В зависимо- сти от тепло- ности нагрузки в районе	В зависимости от теплопотерь зда- ния	В зависимости от количества приборов и потребителей
Определение диаметра	По расчетному перепаду давления для участка	По удельным потерям дав- ления	По расчетному перепаду давления для участка	По скорости движе- ния воды
Увязка колец сети	Рассчитывается изменение пото- кораспределения по отношению к расчетному. Рас- ход на отдельных участках не дол- жен быть меньше минимально до- пустимого	При расчете аварийных режимов	Не допускается в тупиковых систе- мах невязка по давлению более 15 %. Изменение пото- кораспределения не рассчитывается	Не допускается не- вязка более 10 %. Изменение потоко- распределения не рассчитывается
Побуждение среды к движе- нию	Сравнивается сум- марный перепад давления в системе с располагаемым	Подбираются сетевые и подпиточные насосы	Решается вопрос о необходимости установки смеси- тельного насоса до гидравлического расчета	Решается вопрос о необходимости ус- тановки повыси- тельных и циркуля- ционных насосов

В газовых распределительных сетях низкого давления не учитывается сжимаемость газа, как и в расчетах трубопроводов, транспортирующих во- ду. Для газовых сетей низкого давления условие экономичного рас- пределения расчетного перепада давления по направлению имеет вид

$$\sum_{i=1}^{n_p} \frac{\operatorname{sgn}(V_i) C_{ii}^m V_i^{0,37} l_i^{1,21}}{\Delta p_i^{1,21}} = 0, \quad (1)$$

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; C_{it}^m – дисконтированные затраты в долях от материальной характеристики для участка сети, руб/(мм·м); V_i – расход газа на участке, м³/ч; l_i – расчетная длина участка, м; Δp_i – перепад давления на участке, Па.

Из уравнения (1) видно, что эффект от применения данного условия (по сравнению с принципом равномерного распределения расчетного перепада давления по направлению) будет больше при изменении расчетных расходов на участках сети при сравнительно небольших длинах участков. Поэтому для тепловых сетей принцип равномерного распределения расчетного перепада давления дает хорошие результаты. Однако при проектировании тепловых сетей с учетом перспективы развития, когда их строительство предусмотрено в несколько этапов на протяжении ряда лет, проектирование необходимо проводить с учетом оптимизации по дисконтированным затратам.

Известны два метода гидравлического расчета систем отопления: по удельным потерям давления на трение и по характеристикам сопротивления [2, 3]. Оба метода используют принцип постоянства перепада давления по расчетному направлению (циркуляционному кольцу). Как показано на примере газовых сетей [1, 4, 5], этот принцип не оправдан экономически даже в случае, когда система выполняется только из стальных труб, и тем более в случае, если наряду со стальными трубами применяются полимерные или металлополимерные трубы (они имеют различные затраты на строительство и эксплуатацию).

Таким образом, при известном располагаемом перепаде давления гидравлический расчет систем отопления и водоснабжения можно проводить с оптимизацией – по аналогии с сетями газоснабжения.

В рыночной экономике целесообразность инвестирования проекта оценивается с точки зрения следующих критериев: чистой дисконтированной стоимости, внутреннего уровня доходности, дисконтного срока окупаемости, индекса доходности. Эти критерии определяются сопоставлением дисконтированного дохода и дисконтированных затрат. Особенность систем отопления состоит в том, что доход определяется количеством поставляемой теплоты, являющейся конкретной величиной для каждой системы отопления, а когда доход фиксирован, упомянутые критерии достигают оптимального значения при минимуме дисконтированных затрат

$$ДЗ = \sum_{t=1}^T \frac{K_t + C_t}{(1 + E)^t}, \quad (2)$$

где K_t, C_t – капитальные и эксплуатационные затраты на строительство участков системы отопления за период строительства t , руб; E – коэффициент дисконтирования; T – продолжительность строительства.

Целевую функцию в виде дисконтированных затрат удобно представить следующим образом:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n ДЗ_i = \sum_{i=1}^n C_{it}^m d l_i, \quad (3)$$

где d_i – диаметр участка системы, мм.

Удельные дисконтированные затраты учитывают разную стоимость материала трубопроводов, увеличение толщины стенки при повышении диаметра трубы и особенности прокладки, влияющие на стоимость: наличие (отсутствие) тепловой изоляции, скрытую или открытую прокладку участка трубопровода.

Условие экономичного распределения расчетного перепада давления на участке системы отопления определяется по формуле

$$\Delta p_i = \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{\rho w_i^2}{2} + \sum \zeta_i \frac{\rho w_i^2}{2}, \quad (4)$$

где λ_i – коэффициент гидравлического сопротивления по длине трубы; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; w_i – скорость движения теплоносителя, м/с.

Формулу (4) можно представить в виде:

$$\Delta p_i = \lambda_i \frac{(l_i + l_{\text{э}}) \rho w_i^2}{d} \quad (5)$$

или

$$\Delta p_i = \lambda_i \frac{8 V_i^2 (l_i + l_{\text{э}})}{\pi^2 d_i^5}, \quad (6)$$

где V_i – расход теплоносителя, кг/ч; $l_{\text{э}}$ – эквивалентная длина местных сопротивлений, м.

Коэффициент гидравлического сопротивления по длине λ_i зависит от режима движения теплоносителя и материала участка системы отопления [3, 6]. Для режима гидравлической гладкости справедлива формула Блазиуса. Диаметр участка определяется по формуле

$$d_i = \frac{a^{0,21} V_i^{0,37} (l_i + l_{\text{э}})^{0,21}}{\Delta p_i^{0,21}}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) целевая функция (3) приобретает вид

$$\Phi = \sum_{i=1}^n C_{it}^m \frac{a^{0,21} V_i^{0,37} (l_i + l_{\text{э}})^{0,21} l_i}{\Delta p_i^{0,21}}. \quad (8)$$

После оптимизации целевой функции методом Лагранжа получено условие экономичности, сформулированное в виде узлового уравнения

$$\sum_{i=1}^{n_y} \frac{\text{sgn}(V_i) C_{it}^m V_i^{0,37} (l_i + l_{\text{э}})^{0,21} l_i}{\Delta p_i^{1,21}} = 0, \quad (9)$$

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.

Для определения величины C_{it}^m необходимо оценить стоимость строительства и эксплуатации участков системы отопления при различных диаметрах, материалах трубы и других характеристиках прокладки участка системы.

На основании полученного экономичного распределения расчетного перепада давления подбираются расчетные, а на основании их и стандарт-

ные диаметры участков системы отопления. Погрешность, связанная с допущением, что в системе на всех участках режим движения теплоносителя соответствует гидравлической гладкости, устраняется в результате определения потери давления на участке с учетом гидравлического режима движения теплоносителя и материала трубы.

При подборе диаметров необходимо также учитывать максимально допустимые скорости движения теплоносителя на участке.

В отличие от кольцевых сетей газоснабжения с равномерно распределенной нагрузкой, в которых допускается перераспределение транзитных расходов по отдельным участкам сети, в системах отопления отклонение от расчетного значения расхода не допускается. Поэтому подбор стандартных величин диаметров лучше производить не по направлению (циркуляционному кольцу), а от узла к узлу. Когда участки, входящие в узел, замыкают кольцо, можно производить гидравлическую увязку кольца с учетом стандартных диаметров участков кольца по формуле Лобачева – Кросса (10). Диаметры последующих участков подбираются с учетом невязки по давлению в кольце

$$\Delta V_c = - \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \text{sgn}(\Delta p_i^k) (\Delta p_i^k)}{1,75 \sum_{i=1}^{n_k} \frac{(\Delta p_i^k)}{V_i}}, \quad (10)$$

где n_k – количество участков, образующих кольцо; $\text{sgn}(\Delta p_i^k)$ равен «+1» при движении газа на участке по часовой стрелке и «-1» – при движении газа на участке против часовой стрелки.

При увязке колец необходимо следить, чтобы изменение потокораспределения не было вызвано невязкой в кольце больше 15 % для тупиковых систем, иначе потребитель не получит нужного количества теплоты. При невязке в кольце более 15 % необходимо предусматривать установку диафрагм.

Такой способ подбора диаметров приводит к меньшему изменению расчетного потокораспределения при переходе от расчетных значений диаметров к стандартным.

В итоге следует записать физико-математическую модель гидравлического расчета трубопровода. Она представляет собой систему, состоящую из уравнений, учитывающих: падение давления в трубопроводе (4), условия экономичности (9) и увязки узлов сети по условию

$$\Delta p^y = \frac{\sum_{i=1}^{n_y} \text{sgn}(V_i) C_{it}^m V_i^{0,37} (l_i + l_{i3})^{0,21} l_i (\Delta p_i^k)^{-1,21}}{1,21 \sum_{i=1}^{n_y} C_{it}^m V_i^{0,37} (l_i + l_{i3})^{0,21} l_i (\Delta p_i^k)^{-2,21}}; \quad (11)$$

ограничения в виде уравнений Кирхгофа:

$$\sum_{i=1}^{n_y} \text{sgn}(V_i) V_i = V_i^{\text{узн}}; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} \text{sgn}(\Delta p_i^k) (\Delta p_i^k) = 0 \quad (13)$$

и условия технологичности

$$\sum_{i=1}^{n_n} (\Delta p_i) \leq \Delta p_p, \quad (14)$$

а также (10). Кроме этого, модель включает в себя матрицу соединений $\bar{A}$, матрицу контуров $\bar{B}$ и матрицу направлений $\bar{C}$, что позволяет математически представить структуру системы.

После увязки трубопроводной сети по условию экономичности (9) по формуле (11) для системы отопления справедливо:

$$\begin{aligned} \bar{A} \frac{C_{it}^m V_i^{0,37} (l_i + l_b)^{0,21} l_i}{\Delta p_i^{1,21}} &= 0; \\ \bar{A} V_i &= V_i^{узн.}; \\ \bar{B} \Delta p_i &= 0; \\ \bar{C} \Delta p_i &= \Delta p_p. \end{aligned} \quad (15)$$

В качестве практической реализации методики нужно отметить, что расчет вертикальной однотрубной стальной системы отопления, состоящей из многих (24) стояков, показал, что сокращение массы труб в результате применения предлагаемой методики составило 5,8 %.

ВЫВОД

Сопоставление методик гидравлического расчета трубопроводных инженерных сетей показало, что их гидравлический расчет по аналогии с сетями газоснабжения возможно проводить с оптимизацией по критерию дисконтированных затрат. Приведена математическая модель ресурсосберегающей методики гидравлического расчета систем отопления. При определении экономического эффекта необходимо иметь в виду, что сокращение материалоемкости внутренней сети в стоимости на 10 % позволит снизить стоимость строительства только на 4–5 %, так как стоимость работ по монтажу трубопроводов, накладные и плановые накопления не зависят от их диаметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. С а в а с т и е н о к, А. Я. Оптимизация комбинированных распределительных газовых сетей при гидравлическом расчете: автореф. дис. ... канд. техн. наук БНТУ / А. Я. Савастиенок. – Минск: 2003. – 20 с.
2. Е р е м к и н, А. И. Тепловой режим зданий: учеб. пособие / А. И. Еремкин, Т. И. Королева. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 368с.
3. С к а н а в и, А. Н. Отопление: учеб. для вузов / А. Н. Сканава, Л. М. Махов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 576 с.
4. Л е в и н, А. М. Расчет газовых сетей на минимум металла / А. М. Левин, В. А. Смирнов, А. Я. Черкасова // Газовая промышленность. – 1966. – № 9.
5. П а н о в, М. Я. Оптимизация гидравлических сетевых систем при решении задач проектирования / М. Я. Панов, И. С. Квасов, В. М. Круглякова // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1997. – № 9–10. – С. 81–84.
6. П1-03 к СНБ 4.02.01–03. «Проектирование и устройство систем отопления из полимерных труб» / Минстроярхитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2005.

Представлена кафедрой
газоснабжения

Поступила 14.02.2006