

Оценка погрешности определения коэффициента гидравлического сопротивления

Китайцева Е.Х., Яворовский Ю.В., Генварев А.А., кандидаты техн. наук

Проводится анализ влияния погрешности различных параметров на погрешность определения гидравлического сопротивления участков тепловой сети.

Ключевые слова: тепловая сеть, погрешность, исходная информация, коэффициент гидравлического трения.

Estimation to inaccuracy of the determination of the factor of the hydraulic resistance

Kitaiseva E., Yavorovskiy Y.V., Genvareov A.A., candidates of science

The analysis of influence of an error of various parameters on an error of definition of hydraulic resistance of sites of a thermal network is carried out.

Keywords: the heat network, inaccuracy, source information, factor of hydraulic friction.

Задачи, связанные с анализом работы реальных водяных тепловых сетей и управлением их эксплуатацией и развитием, решаются в условиях той или иной неопределенности. Незнание истинных параметров и топологии тепловой сети, недостаточная оснащенность измерительными приборами и датчиками, большая погрешность и неоднородность тех данных, которые удается получить, приближенность математического моделирования и т.д. – вот те факторы, из которых складывается неопределенность при управлении эксплуатацией. Эта неопределенность может быть существенно уменьшена при проведении детальной и грамотной паспортизации всех объектов и трубопроводов сети.

Хотя паспортизация является рекомендованным [1] видом деятельности организации, эксплуатирующей тепловую сеть, сбор и ввод информации осуществляется только при наличии воли руководства. Процесс паспортизации – процесс продолжительный и постоянный: тепловые сети ремонтируются, реконструируются, модернизируются, развиваются. Паспорт любого объекта, будучи только что заполненным, уже требует внесения изменений. Последовательность проведения паспортизации не регламентирована, поэтому ее, к сожалению, начинают не с топологии сети, а с отдельных объектов (абонентских вводов, трубопроводов, запорной арматуры и т.д.). В результате информации много, а тепловую сеть как единое целое, как систему, представить не удается.

Идентификация – процесс приближенного отображения (отождествления) функционирующей системы в виде математической модели, способной замещать реальный объект. Идентификация – обязательный этап управления, неизбежно проходит в условиях неопределенности.

Проблему идентификации можно рассматривать с разных позиций. Так, например, в [2] был предложен метод «математического

расходомера», позволяющий найти оценку эквивалентной шероховатости трубопроводов. Для реализации метода требовалась многократная манометрическая съемка во всех узлах сети и замеры расхода у отдельных потребителей. При этом об ошибке измерений давлений и расходов не упоминается.

Другой подход [3], использованный для идентификации параметров систем холодного водоснабжения, учитывает погрешность измерений давлений в узлах сети и расходов на участках.

В обоих случаях считаются достоверно известными топология сети, параметры участков (длина, внутренний диаметр, сумма коэффициентов местных сопротивлений).

Гидравлические сопротивления s «аккумулируют» в себя параметры участков, и именно они в явном виде используются при математическом моделировании потокораспределения в гидравлических сетях, в том числе и тепловых:

$$s = \frac{10^{12}}{2g(0,9\pi)^2 \rho^2} \frac{1}{d^4} \left(1000l \frac{\lambda}{d} + \sum \xi \right), \quad (1)$$

где $\rho, l, d, \lambda, \sum \xi$ – параметры участка, соответственно: плотность теплоносителя, кг/м³; длина, м; внутренний диаметр, мм; коэффициент гидравлического трения; сумма коэффициентов местных сопротивлений.

В общем виде коэффициент гидравлического трения λ является функцией трех параметров – числа Рейнольдса Re , эквивалентной шероховатости $K_{э\kappa\text{в}}$ и внутреннего диаметра d , причем вид функции определяется режимом течения. В излагаемом материале использовалась формула [4]

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \lg \frac{d}{K_{э\kappa\text{в}j}} \right)^2}, \quad (2)$$

где $K_{эжв}$ – эквивалентная шероховатость, мм.

Все параметры, от которых зависят гидравлические сопротивления (1), задаются с некоторой погрешностью. Оценим значимость погрешности каждого параметра в ошибке определения s_j .

Так как функция (1) является нелинейной по ряду параметров, ее необходимо линеаризовать [5]:

$$\begin{aligned} s(l, d, \sum \xi, K_{эжв}, \rho) \approx & s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0) + \\ & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial l} (l - l^0) + \\ & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial d} (d - d^0) + \\ & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial \sum \xi} (\sum \xi - \sum \xi^0) + \\ & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial K_{эжв}} (K_{эжв} - K_{эжв}^0) + \\ & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial \rho} (\rho - \rho^0), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\frac{\partial s}{\partial l} = \frac{10^{15}}{2g(0,9\pi)^2 \rho^2} \frac{\lambda}{d^5}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \sum \xi} = \frac{10^{12}}{2g(0,9\pi)^2 \rho^2 d^4}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \rho} = -\frac{10^{12}}{g(0,9\pi)^2 \rho^3} \frac{1}{d^4} \left(1000l \frac{\lambda}{d} + \sum \xi \right); \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial K_{эжв}} = & \frac{2 \cdot 10^{15} l}{g(0,9\pi)^2 \rho^2 d^5 K_{эжв}} \times \\ & \times \frac{1}{\ln(10) \left(1,14 + 2 \lg \frac{d}{K_{эжв}} \right)^3}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial d} = & -\frac{10^{12}}{2g(0,9\pi)^2 \rho^2} \frac{1}{d^5} \left\{ \frac{1000l}{d \left(1,14 + 2 \lg \frac{d}{K_{эжв}} \right)^2} \times \right. \\ & \times \left. \left[\frac{4}{\ln(10) \left(1,14 + 2 \lg \frac{d}{K_{эжв}} \right)} + 5 \right] + 4 \sum \xi \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Дисперсия, вычисленная для линеаризованного выражения, является приближенной и применима лишь в малой окрестности выбранной точки, где функция заменяется линеаризованным выражением:

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 \approx & \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial l} \right]^2 \sigma_l^2 + \\ & + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial d} \right]^2 \sigma_d^2 + \\ & + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial \sum \xi} \right]^2 \sigma_{\sum \xi}^2 + \\ & + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial K_{эжв}} \right]^2 \sigma_{K_{эжв}}^2 + \\ & + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \sum \xi^0, K_{эжв}^0, \rho^0)}{\partial \rho} \right]^2 \sigma_\rho^2. \end{aligned} \quad (9)$$

В общем случае параметры участка могут изменяться в широких диапазонах, представленных в таблице, при этом гидравлическое сопротивление меняется на 11 порядков от $1,87 \cdot 10^{-10}$ до $88,1 \text{ м/(т/ч)}^2$.

Диапазоны изменения параметров участков тепловой сети и отклонения параметров от их текущих значений

Параметр	Диапазон изменения		Зσ		
	Минимум	Максимум	Абс.	10%	1000
Длина l , м	1	10000	1	0,1	1000
Внутренний диаметр d , мм	40	1400	10	4	140
Сумма коэффициентов местных сопротивлений	0,1	100	0,1	0,01	10
Эквивалентная шероховатость $K_{эжв}$, мм	0,5	5	0,5	0,05	0,5
Плотность ρ , кг/м ³	904	992	44	90,4	99,2

Выбор диапазонов продиктован следующими соображениями. Наименьший условный диаметр, рекомендуемый для применения в тепловых сетях, составляет 40 мм, наибольший существующий – 1400 мм; наибольшее значение суммы коэффициентов местных сопротивлений (100) соответствует участку с диафрагмой или с частично закрытой задвижкой; минимальное значение эквивалентной шероховатости – регламентируемому значению для новых труб, максимальное – трубе, бывшей в эксплуатации; минимальное значение плотности определено для температуры теплоносителя 150 °С, максимальное – для температуры 40 °С.

Для решения поставленной задачи был спланирован полный 2-уровневый 5-факторный эксперимент. Результаты эксперимента позволили определить диапазон изменения относительной погрешности от 3,1 до 56,4 %.

Ранжирование параметров по значимости их влияния на относительную ошибку определения гидравлического сопротивления, полученное в результате дисперсионного анализа, проведенного с помощью алгоритма Йетса [6], дало следующий порядок параметров:

- внутренний диаметр;
- сумма коэффициентов местных сопротивлений;
- длина.

Несмотря на заданную, достаточно большую погрешность эквивалентной шероховатости и плотности (см. таблицу), эти параметры не оказывают значимого влияния на относительную ошибку. Поэтому можно считать вполне правомерным пренебрежение изменением плотности теплоносителя в зависимости от температуры и использование в гидравлических расчетах константы $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Если в численном эксперименте в качестве максимальной погрешности использовать 10%-ное отклонение от текущего значения параметра (см. таблицу), то диапазон изменения относительной погрешности уменьшится и составит 15,3–20,2 %, при 5 %-ном отклонении диапазон уменьшится в 2 раза и составит 7,6–10,1 %. При этом, по-прежнему, эквивалентная шероховатость и плотность не оказывают значимого влияния. Остальные параметры по

значимости распределяются следующим образом:

- длина;
- внутренний диаметр;
- сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Список литературы

1. **Методические** рекомендации по составу и объему технической документации на предприятиях тепловых сетей системы жилищно-коммунального хозяйства. Вып. 1. Тепловые сети. – М.: Энергоатомиздат.
2. **Меренков А.П., Хасилев В.Я.** Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985.
3. **Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Дубровский В.В.** Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – М.: Стройиздат, 1990.
4. **Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей** / В.И. Манюк, Я.М. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. – М.: Стройиздат, 1988.
5. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973.
6. **Джонсон Н., Лион Ф.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1981.

Китайцева Елена Халиловна,
Московский энергетический институт (технический университет),
кандидат технических наук,
e-mail: y1000@list.ru

Яворовский Юрий Викторович,
Московский энергетический институт (технический университет),
кандидат технических наук, доцент,
телефоны: (495) 362-75-53, 8-916-177-33-73,
e-mail: y1000@list.ru

Генварёв Алексей Александрович,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИСа,
телефон (4932) 26-98-86,
e-mail: kbispu@mail.ru