

Оценка погрешности параметров тепловой сети

Е.Х. Китайцева, Ю.В. Яворовский, В.В. Сенников, кандидаты техн. наук, Т.Ю. Полуэктова, асп.

Проводится анализ влияния погрешности исходных данных на результат, который позволяет сформулировать последовательность уточнения параметров тепловой сети.

Ключевые слова: тепловая сеть, идентификация параметров сети, погрешность исходных данных, многофакторный эксперимент.

Parameters Accuracy Assessment of Heating Network

E.Kh. Kitaytseva, Yu.V. Yavorovskiy, V.V. Sennikov, Candidates of Engineering,
T.Yu. Poluektova, Post Graduate Student

The authors analyze the accuracy influence of the data source on the result which allows to form the sequence of parameters specifications of the heating system.

Key words: heating network, identification of network parameters, accuracy of initial data, multifactor experiment.

Погрешность задания коэффициентов гидравлических сопротивлений каждого участка тепловой сети можно оценить по [1]. Но связь между участками в каждой тепловой сети индивидуальны, поэтому попытка классифицировать топологию сетей и затем вычислять погрешность гидравлических сопротивлений совокупности участков, на наш взгляд, не имела бы успеха. Совокупная погрешность гидравлических сопротивлений участков сказывается на результатах численного моделирования потоко-распределения в сети.

Первый вопрос, возникающий при идентификации объекта – это выбор параметров – откликов, по которым можно судить о том, что заложенные в расчет значения соответствуют данным объекта. Второй вопрос – возможность проведения одновременных замеров этих параметров.

В качестве параметров-откликов, характеризующих всю сеть целиком, можно предложить следующие:

- гидромеханическая мощность

$$N_{\text{мех}} = H_{\text{ист}} G_{\text{ист}} = \sum_{j=1}^{m_{\text{тр}}} y_j x_j + \sum_{j=m_{\text{тр}}+1}^{m_{\text{тр}}+m_{\text{аб}}} y_j x_j; \quad (1)$$

- тепловая мощность

$$N_{\text{теп}} = c G_{\text{ист}} (T_1^{\text{ист}} - T_2^{\text{ист}}) = \sum_{i=1}^{m_{\text{тр}}} c x_i (t_j(0) - t_j(l_j)) + \sum_{i=m_{\text{тр}}+1}^{m_{\text{тр}}+m_{\text{аб}}} c x_i (t_j(0) - t_j(l_j)), \quad (2)$$

где $H_{\text{ист}}$ – располагаемый напор сети; $G_{\text{ист}}$ – циркулирующий расход; x_j – расход на участке j ; y_j – изменение напора на участке j , м; $m_{\text{тр}}$ – количество ветвей, моделирующих трубопроводы тепловой сети; $m_{\text{аб}}$ – количество ветвей, моделирующих абонентские вводы; c – удельная теплоемкость; $T_1^{\text{ист}}$ – температура теплоносителя на выходе из источника теплоснабжения; $T_2^{\text{ист}}$ – температура теплоносителя на входе источника

теплоснабжения; $t_j(0)$, $t_j(l_j)$ – температура теплоносителя в начале (0) и в конце (l_j) участка j .

Несмотря на все еще слабую оснащенность тепловых сетей измерительными приборами, можно предположить, что на источниках теплоснабжения в большинстве случаев контролируются параметры, входящие в левую часть выражений (1) и (2). В любом случае их одновременное измерение представляется вполне выполнимой задачей.

При сопоставлении левой (измеренной) и правой (вычисленной) частей выражений (1) и (2) нельзя забывать о погрешности измерений гидромеханической и тепловой мощностей источника, которая зависит как от способа измерений, так и от погрешности измерительных приборов.

При идентификации параметров сети необходимо максимально использовать всю имеющуюся информацию о замерах параметров. Обычно измерительные узлы устанавливают на абонентских вводах, поэтому в качестве сопоставляемых величин можно использовать измеренные и вычисленные значения следующих параметров-откликов:

- напоры в подающем и обратном трубопроводах или располагаемый напор;
- температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах;
- расход теплоносителя.

Важным параметром является некая усредненная температура внутреннего воздуха в отапливаемых зданиях, которую вычислить возможно, а измерить затруднительно. Поэтому этот параметр переходит из категории количественных в категорию качественных, поскольку его отклонение от расчетного можно оценить, используя наличие или отсутствие жалоб жильцов.

Следует оговориться, прежде чем продолжать дальнейшие рассуждения, что топология сети должна быть известна точно, т. е. должны быть известны не только геометрические параметры основных магистралей и квартальных ответвлений от них, но, что особенно важно, все

перемычки между подающими и обратными трубопроводами, проверено наличие, состояние и положение запорной арматуры на них.

В качестве гипотезы можно утверждать, что некорректное задание топологии сети не позволит, варьируя значения параметров, получить приемлемое совпадение измерений и результатов расчета. Но это только гипотеза, требующая отдельного рассмотрения.

Уточнение значений параметров тепловой сети возможно только одним способом – выходом на рассматриваемый объект. Оценить влияние погрешности значений параметров на результат возможно путем проведения численного эксперимента. Не менее важно, на наш взгляд, определить последовательность уточнения значений параметров.

Для решения поставленной задачи был проведен численный эксперимент.

В качестве объекта была выбрана тепловая сеть (рис. 1).

Сеть состоит из одного источника, девяти участков и пяти абонентов. Длины, диаметры, суммы коэффициентов местных сопротивлений участков и тепловая нагрузка абонентов различны. Значения этих параметров даны на рис. 1.

Предполагалось следующее:

- расчетная температура наружного воздуха $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- текущая температура наружного воздуха совпадает с расчетной;
- температурный график источника 140/70 $^{\circ}\text{C}$;
- располагаемый напор источника 80 – 40 = 40 м и постоянен;
- среднегодовые температуры наружного воздуха, теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах соответственно 3,8; 79,1 и 53,7 $^{\circ}\text{C}$;
- все участки имеют надземную прокладку;
- коэффициент теплопередачи тепловой изоляции трубопроводов соответствует нормативным тепловым потерям трубопроводов, спроектированным до 1990 г.;
- коэффициент эквивалентной шероховатости всех участков одинаковый;

• все абоненты имеют тепловую нагрузку только на системы отопления, которые подключены непосредственно к тепловой сети;

• расчетные потери напора при расчетном расходе теплоносителя в каждой системе отопления составляют 2 м;

• расчетная температура внутреннего воздуха 18 $^{\circ}\text{C}$.

В качестве факторов, погрешность в задании которых влияет на погрешность сопоставляемых параметров-откликов, перечисленных выше, были выбраны:

- длины участков – l ;
- внутренние диаметры участков – d ;
- эквивалентная шероховатость – k ;
- суммы коэффициентов местных сопротивлений – s ;
- тепловая нагрузка абонентов – q .

В качестве реперной точки, по отношению к которой определялись погрешности значений параметров-откликов, были выбраны результаты численного моделирования неизотермического потокораспределения в тепловой сети.

Был спланирован полный двухуровневый пятифакторный эксперимент, состоящий из 32 вариантов расчета (табл. 1). В каждом варианте моделировалось потокораспределение в одной и той же тепловой сети, но в выбранные параметры-факторы вносилась погрешность, одинаковая для всех факторов.

Столбцы 3–7 в табл. 1 содержат значение уровня фактора. Значение уровня (–1) соответствует нижнему уровню, значение (1) – верхнему.

Например, в варианте 14 были увеличены:

- длина каждого участка l_j на величину $0,01s_p l_j$ (s_p – заданная погрешность, %);
 - коэффициент эквивалентной шероховатости $K_{\text{ЭКВ}}$ на $0,01s_p K_{\text{ЭКВ}}$;
 - сумма коэффициентов местных сопротивлений каждого участка j $\Sigma\zeta$ на $0,01s_p \Sigma\zeta$;
- и уменьшены:
- диаметр участка d_j на $0,01s_p d_j$;
 - нагрузка каждого абонента $Q_{\text{аб}j}$ на $0,01s_p Q_{\text{аб}j}$.

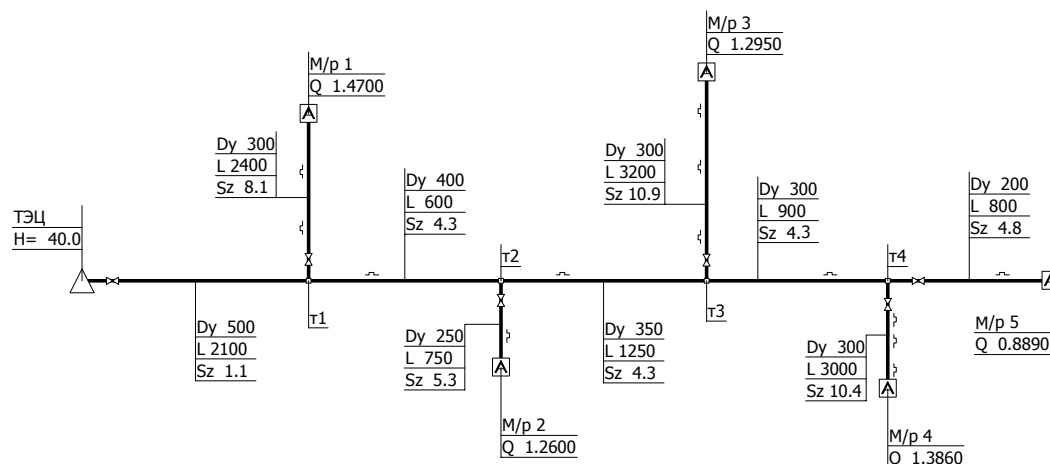


Рис. 1. Схема тепловой сети

Таблица 1. Результаты 2-уровневого 5-факторного эксперимента

Вариант	Фактор					Сеть		Абонент М/р 5				Сеть		Абонент М/р 5				
	L	d	K _{экв}	Sz	Q	N _{теп}	N _{мех}	dP	G	t ₁	t _в	N _{теп}	N _{мех}	dP	G	t ₁	t _в	
						%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
						s _p , %												
3,0								30										
1	-1	-1	-1	-1	-1	7,5	3,7	2,1	4,0	-1,5	-0,8	38,2	37,2	26,5	40,0	-16,1	1,0	
2	1	-1	-1	-1	-1	5,4	4,4	4,1	5,0	-2,1	0,2	22,9	45,2	49,9	50,5	-30,1	16,9	
3	-1	1	-1	-1	-1	2,6	0,2	-8,4	-1,0	3,4	-1,1	24,1	20,3	-44,2	15,9	15,5	-3,1	
4	1	1	-1	-1	-1	0,2	0,8	-6,6	-0,1	3,1	-0,1	-2,9	21,1	-40,1	17,1	18,5	7,6	
5	-1	-1	1	-1	-1	7,6	3,9	2,7	4,3	-1,7	-0,7	38,6	39,6	34,4	43,3	-22,0	2,6	
6	1	-1	1	-1	-1	5,5	4,7	4,8	5,3	-2,4	0,3	23,9	48,0	57,0	54,1	-38,1	20,0	
7	-1	1	1	-1	-1	2,6	0,4	-7,8	-0,7	3,2	-1,0	24,1	20,5	-43,2	16,2	15,3	-3,0	
8	1	1	1	-1	-1	0,2	1,0	-6,0	0,1	2,8	0,0	-2,8	21,5	-38,4	17,7	18,1	7,8	
9	-1	-1	-1	1	-1	7,5	3,7	2,2	4,1	-1,5	-0,8	38,2	37,5	27,5	40,4	-16,8	1,1	
10	1	-1	-1	1	-1	5,4	4,5	4,2	5,1	-2,1	0,2	23,0	45,3	50,4	50,7	-30,5	17,1	
11	-1	1	-1	1	-1	2,6	0,2	-8,3	-0,9	3,4	-1,1	24,1	20,3	-44,0	16,0	15,5	-3,1	
12	1	1	-1	1	-1	0,2	0,8	-6,5	-0,1	3,0	-0,1	-2,9	21,2	-39,9	17,2	18,5	7,6	
13	-1	-1	1	1	-1	7,6	4,0	2,8	4,4	-1,8	-0,7	38,6	39,8	35,2	43,6	-22,6	2,8	
14	1	-1	1	1	-1	5,5	4,7	4,9	5,4	-2,4	0,3	23,9	48,1	57,3	54,3	-38,5	20,2	
15	-1	1	1	1	-1	2,6	0,4	-7,7	-0,7	3,2	-1,0	24,1	20,5	-43,0	16,3	15,2	-3,0	
16	1	1	1	1	-1	0,2	1,0	-5,9	0,2	2,8	0,0	-2,8	21,5	-38,1	17,7	18,0	7,8	
17	-1	-1	-1	-1	1	4,3	-0,6	6,4	0,3	-3,8	-0,9	8,6	15,2	70,0	28,7	-74,7	9,0	
18	1	-1	-1	-1	1	2,2	0,2	8,5	1,5	-4,5	0,1	-3,3	31,5	83,0	46,4	-110,3	28,1	
19	-1	1	-1	-1	1	-0,8	-4,6	-4,6	-5,3	1,6	-1,3	-10,7	-43,6	-32,4	-49,6	9,9	-7,9	
20	1	1	-1	-1	1	-3,1	-4,0	-2,7	-4,4	1,1	-0,4	-39,7	-39,0	-20,9	-42,9	8,7	-0,8	
21	-1	-1	1	-1	1	4,3	-0,4	7,1	0,7	-4,1	-0,8	9,6	20,5	74,9	34,9	-88,2	12,2	
22	1	-1	1	-1	1	2,2	0,4	9,2	1,9	-4,8	0,2	-1,3	36,5	86,1	51,5	-126,4	32,9	
23	-1	1	1	-1	1	-0,7	-4,4	-4,0	-5,0	1,4	-1,2	-10,6	-42,5	-29,5	-47,9	9,0	-7,6	
24	1	1	1	-1	1	-3,1	-3,7	-2,1	-4,1	0,9	-0,3	-39,4	-37,2	-16,4	-40,3	7,2	-0,3	
25	-1	-1	-1	1	1	4,3	-0,6	6,5	0,4	-3,8	-0,9	8,7	15,8	70,6	29,5	-76,2	9,4	
26	1	-1	-1	1	1	2,2	0,2	8,6	1,5	-4,6	0,1	-3,2	31,8	83,2	46,7	-111,3	28,4	
27	-1	1	-1	1	1	-0,8	-4,6	-4,5	-5,3	1,6	-1,3	-10,6	-43,3	-31,6	-49,1	9,6	-7,8	
28	1	1	-1	1	1	-3,1	-3,9	-2,6	-4,3	1,1	-0,3	-39,7	-38,7	-20,2	-42,5	8,5	-0,7	
29	-1	-1	1	1	1	4,3	-0,4	7,1	0,7	-4,2	-0,8	9,7	21,0	75,4	35,5	-89,6	12,5	
30	1	-1	1	1	1	2,2	0,5	9,3	1,9	-4,9	0,2	-1,2	36,7	86,2	51,8	-127,3	33,2	
31	-1	1	1	1	1	-0,7	-4,4	-3,9	-5,0	1,3	-1,2	-10,5	-42,2	-28,7	-47,5	8,7	-7,6	
32	1	1	1	1	1	-3,1	-3,7	-2,0	-4,0	0,8	-0,3	-39,4	-36,9	-15,8	-39,9	7,0	-0,2	
Минимум						-3,1	-4,6	-8,4	-5,3	-4,9	-1,3	-39,7	-43,6	-44,2	-49,6	-127,3	-7,9	
Максимум						7,6	4,7	9,3	5,4	3,4	0,3	38,6	48,1	86,2	54,3	18,5	33,2	

Результаты моделирования двух вариантов расчета – 14 и 19 (табл. 1), для которых были выявлены наибольшие относительные погрешности $N_{\text{мех}}$, и двух значений погрешностей – 3 и 30 %, представлены в виде пьезометрического графика (рис. 2) и графика распределения температуры теплоносителя (рис. 3) от источника до контролируемого абонента М/р 5.

Анализ графиков (рис. 2, 3) позволяет выявить накопление ошибки по длине трассы.

Особенно сильное отклонение от реперной кривой (вариант 0) наблюдается для распределения температур в обратном трубопроводе. Поэтому, если существует возможность измерять гидромеханическую и тепловую мощности не только на источнике, но и в узлах сети, то появляется возможность сузить круг поиска.

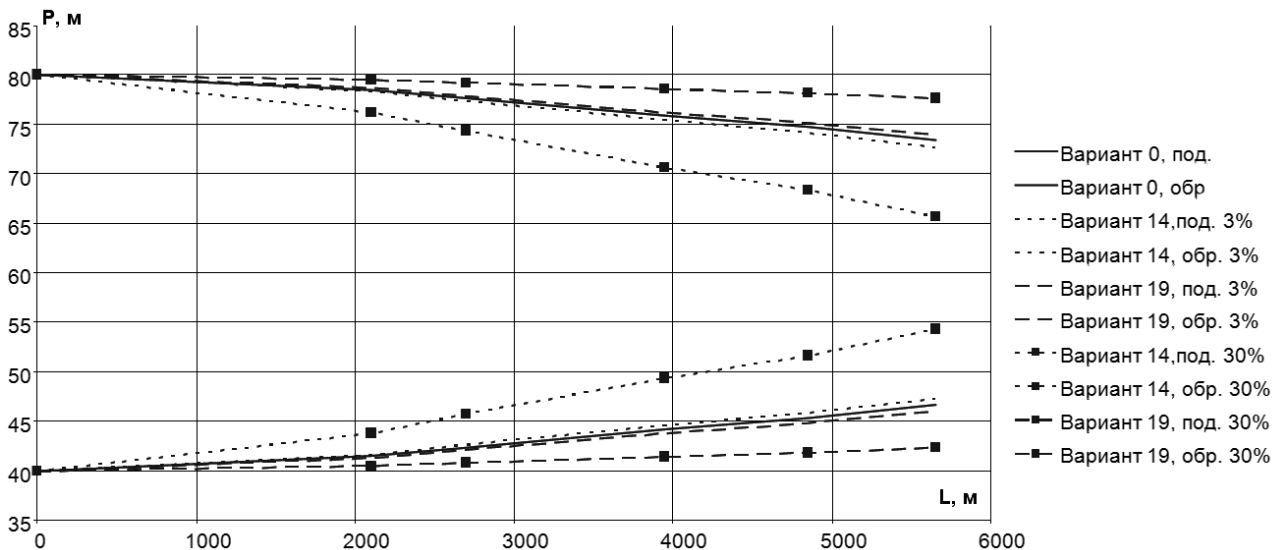


Рис. 2. Пьезометрический график (ТЭЦ-М/р 5)

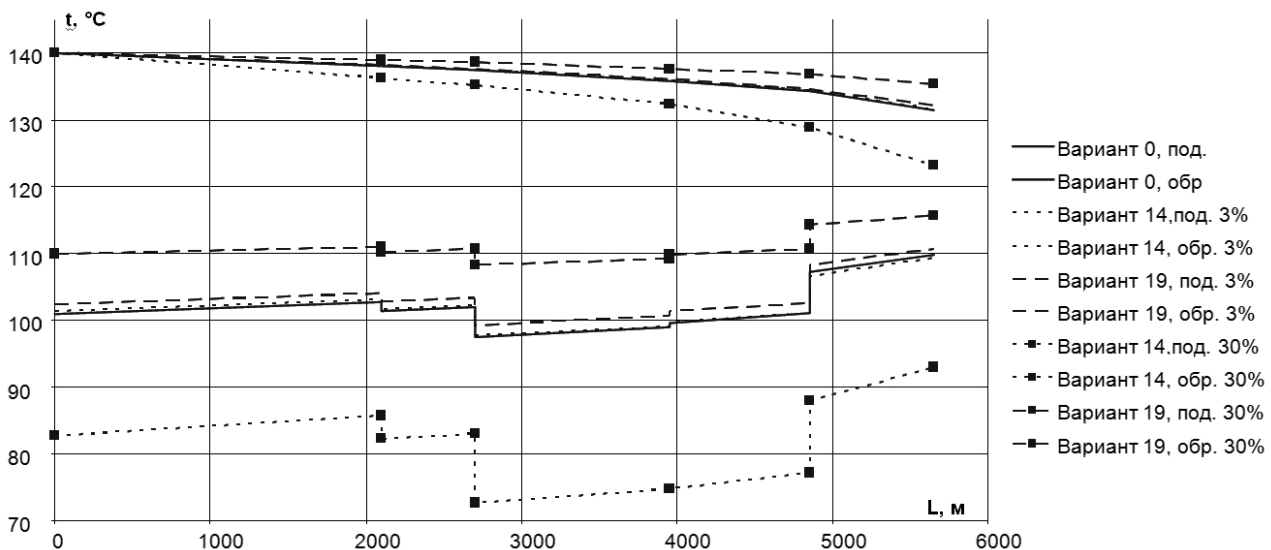


Рис. 3. Распределение температуры по длине трассы (ТЭЦ – М/р 5)

Для каждого значения погрешности проводился дисперсионный анализ, в результате которого определялась значимость фактора (табл. 2). При оценке значимости полагалось, что все взаимодействия (2-х, 3-х, 4-х и 5-ти факторов) равны 0.

При маркировке уровней значимости использовались следующие условные обозначения [2]:

* – уровень значимости от 0,01 до 0,05 – значимый уровень;

** – уровень значимости от 0,001 до 0,01 – высокозначимый уровень;

*** – уровень значимости от 0,0001 до 0,001 – в высшей степени значимый уровень.

Результаты дисперсионного анализа позволяют сделать следующие выводы:

В рамках использованной математической модели для рассматриваемой сети с учетом ее параметров на погрешности значений всех выбранных параметров-откликов самое сильное влияние оказывает погрешность в задании диаметра участков (в высшей степени значимый уровень) и расчетной нагрузки абонентов (в высшей степени значимый уровень для всех откликов, за исключением температуры внутреннего воздуха).

Таблица 2. Значимость факторов

S _p , %	Фактор	Значимость						S _p , %	Фактор	Значимость					
		N _{мех} , %	N _{теп} , %	Δp, %	G, %	t ₁ , %	t _в , %			N _{мех} , %	N _{теп} , %	Δp, %	G, %	t ₁ , %	t _в , %
1	L	***	***	***	***	***	***	15	L	**	***	***	**	*	***
	D	***	***	***	***	***	***		D	***	***	***	***	***	***
	K _{экв}	***		***	***	***	***		K _{экв}			*			
	Σζ								Σζ						
	Q _{аб}	***	***	***	***	***	***		Q _{аб}	***	***	***	***	***	***
3	L	***	***	***	***	***	***	20	L	*	***	***	*	*	***
	D	***	***	***	***	***	***		D	***	***	***	***	***	***
	K _{экв}	**		***	**	**	**		K _{экв}						
	Σζ								Σζ						
	Q _{аб}	***	***	***	***	***	***		Q _{аб}	***	***	***	***	***	***
5	L	***	***	***	***	***	***	25	L	***	***	***	***	***	***
	D	***	***	***	***	***	***		D	***	***	***	***	***	***
	K _{экв}	*		***	*	*	**		K _{экв}						
	Σζ								Σζ						
	Q _{аб}	***	***	***	***	***	***		Q _{аб}	***	***	***	***	***	***
10	L	***	***	***	***	**	***	30	L	***	***	***	***	***	***
	D	***	***	***	***	***	***		D	***	***	***	***	***	***
	K _{экв}			**					K _{экв}						
	Σζ								Σζ						
	Q _{аб}	***	***	***	***	***	***		Q _{аб}	***	***	***	***	***	***

Погрешность в задании суммы коэффициентов местных сопротивлений не оказывает значимого влияния ни на один выбранный показатель.

Погрешность в задании эквивалентной шероховатости не оказывает значимого влияния на погрешность тепловой мощности сети, на другие параметры-отклики, значимость этой погрешности вырастает по мере уточнения других параметров. Первой откликается погрешность располагаемого напора контролируемого абонента (15 % от погрешности задания параметров). Все остальные отклики начинают считать значимой погрешностью в задании эквивалентной шероховатости при 5 % погрешности задания остальных параметров.

Погрешность в задании длин участков в высшей степени значимо влияет на погрешности тепловой мощности сети, располагаемого перепада и температуры внутреннего воздуха у контролируемого абонента. Все остальные отклики начинают считать значимой погрешностью в задании длины участков при 20 % погрешности задания остальных параметров.

Для погрешностей всех откликов прослеживается тенденция к их возрастанию при увеличении погрешности задания параметров (рис. 4–9).

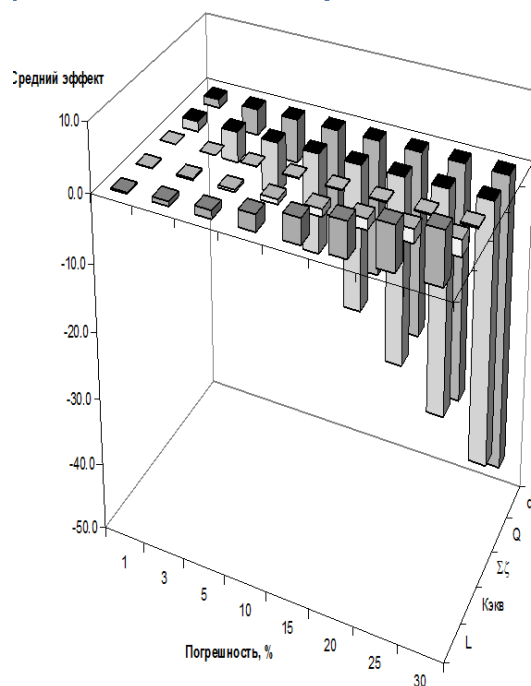


Рис. 4. Влияние средних эффектов факторов на погрешность гидромеханической мощности

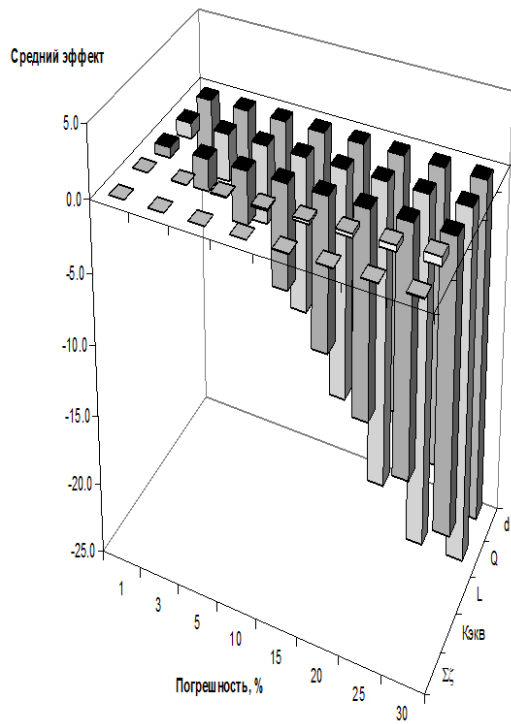


Рис. 5. Влияние средних эффектов факторов на погрешность тепловой мощности

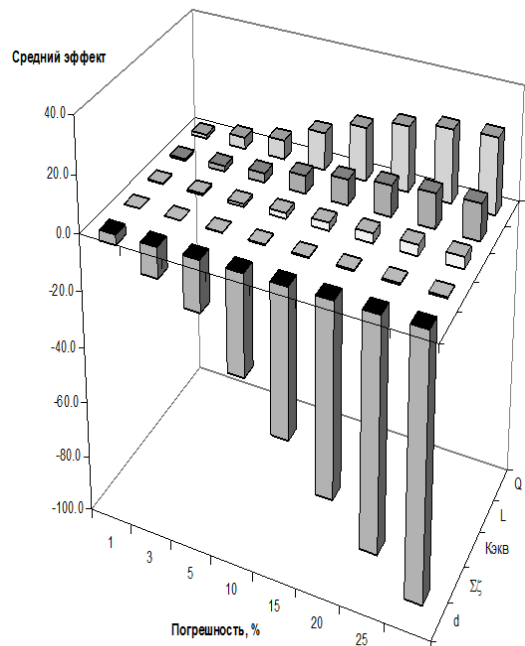


Рис. 7. Влияние средних эффектов факторов на погрешность расхода теплоносителя (нижняя диаграмма) у контролируемого абонента

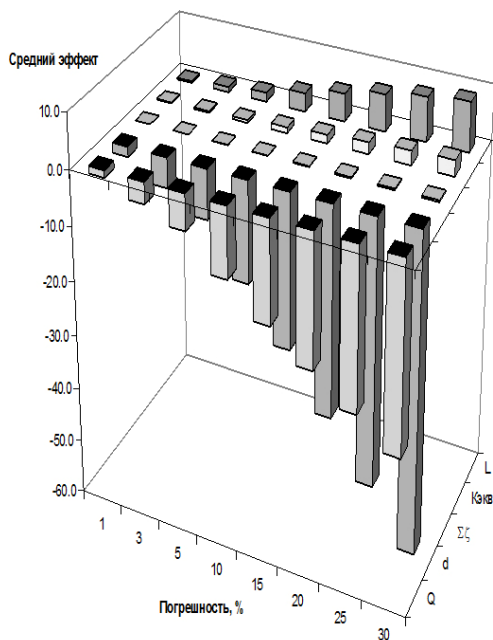


Рис. 6. Влияние средних эффектов факторов на погрешность располагаемого перепада у контролируемого абонента

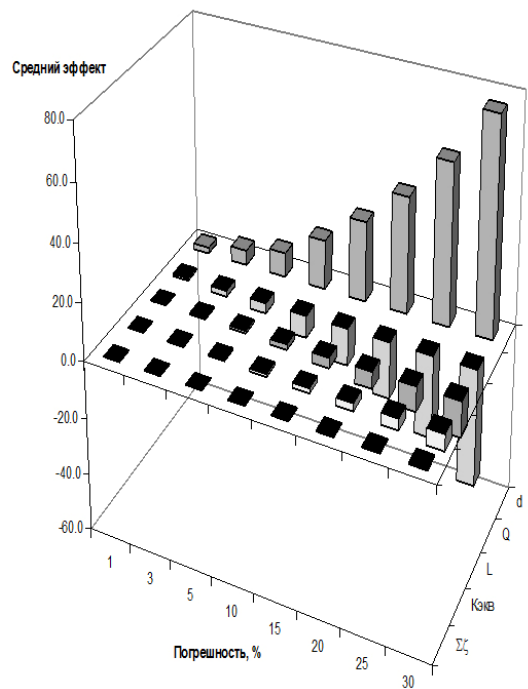


Рис. 8. Влияние средних эффектов факторов на погрешность температуры теплоносителя на вводе контролируемого абонента

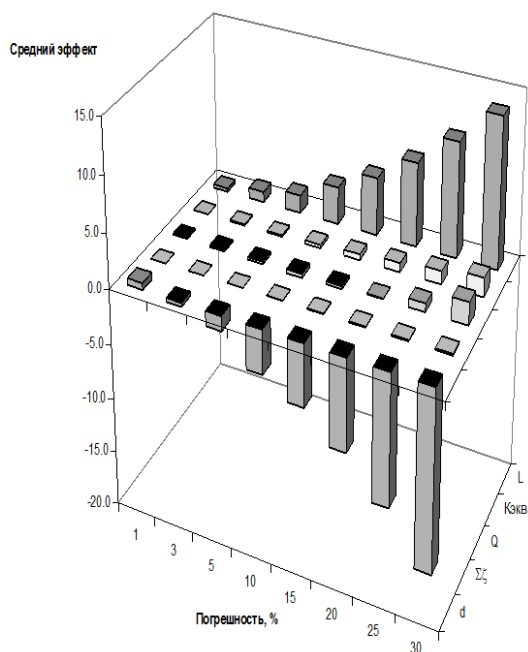


Рис. 9. Влияние средних эффектов факторов на погрешность температуры внутреннего воздуха контролируемого абонента

Все выше изложенное позволяет сделать заключение о последовательности уточнения параметров тепловой сети:

- 1) топология;
- 2) диаметры участков;
- 3) тепловая нагрузка абонентов;
- 4) длины участков;
- 5) эквивалентная шероховатость;
- 6) местные сопротивления.

Список литературы

1. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1981.

2. Китайцева Е.Х., Яворовский Ю.В., Генварев А.А. Оценка погрешности определения коэффициента гидравлического сопротивления // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 4. – С. 30.

Китайцева Елена Халиловна,

ГОУВПО «Московский энергетический институт (Технический университет)»,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленных теплоэнергетических систем,
e-mail: PTES@mpei.ru

Яворовский Юрий Викторович,

ГОУВПО «Московский энергетический институт (Технический университет)»,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленных теплоэнергетических систем,
e-mail: y1000@list.ru

Сенников Владимир Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
e-mail: sennikov11@mail.ru

Полузктова Татьяна Юрьевна,

ГОУВПО «Московский энергетический институт (Технический университет)»,
аспирант кафедры промышленных теплоэнергетических систем,
e-mail: PTES@mpei.ru