

ВЫВОДЫ

1. Применение методики согласования балансов позволяет уточнить значение измеренных величин и в целом улучшить ситуацию по массиву исходной информации при постановке эксперимента по горению топлива. При этом уточнению в первую очередь подлежат наиболее грубые измерения.

2. Наибольший эффект при согласовании балансов достигается, когда: массив погрешностей подчиняется нормальному закону распределения; адекватная оценка среднеквадратичных погрешностей измерений осуществляется с учетом методики измерений; производится учет возможно большего числа балансовых уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Szargut J. Energetyka cieplna w hutnictwie. – Katowice: Śląsk, 1971. – 654 с.
2. Ноздренко Г. В., Овчинников Ю. В. Принцип неравноценности потоков при моделировании процессов производства тепла и электроэнергии на ТЭЦ // Energetyka № 564, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. – Gliwice, 1978. – С. 15–21.
3. Овчинников Ю. В., Ноздренко Г. В., Алтухов И. М. Согласование энергобалансов для уточнения исходной информации по ТЭУ // Управление режимами и развитием энергетических систем в условиях АСУ: Сб. тр. – Новосибирск, 1980. – С. 26–31.
4. Михеев А. В. Оценивание режимов работы и идентификация характеристик оборудования тепловых электрических станций // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2000. – 23 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.01.2001

УДК 621.186.2.001.24

АНАЛИЗ ТЕПЛОПОТЕРЬ ОДИНОЧНОГО ТЕПЛОПРОВОДА

Докт. техн. наук БАЙРАШЕВСКИЙ Б. А.,
канд. техн. наук, доц. СЕДНИН В. А., инж. АБРАЖЕВИЧ С. И.

Белорусская государственная политехническая академия

Механизм потерь теплоты через ограждающие поверхности теплопроводов представляет практический интерес. Возможности вычислительной техники позволяют изучать закономерности теплопотерь при любых режимах работы сетей и соответственно управлять этим процессом в целях его оптимизации согласно реальным обстоятельствам. Такая постановка вопроса на предприятиях, имеющих на своем балансе теплопроводы, способствует повышению уровня их эксплуатации. Предприятия могут быть заинтересованы в подобных программных средствах и использовать их в полном соответствии с действующими правилами технической эксплуатации.

В данной работе излагаются теоретические основы создания программного средства, разработанного и рекомендуемого для использования.

В сущности, речь идет о математической модели теплопроводов двух наиболее характерных модификаций, применяемых в промышленности, а именно в канальной и бесканальной прокладках [1].

Конструктивная схема одного из исследуемых теплопроводов (в канальной прокладке) представлена на рис. 1. Процесс теплопотерь через составные (цилиндрические) элементы обоих устройств с сопротивлениями R_i в количестве $i = 1 - n$ описывается уравнениями Ньютона–Рихмана (в области пограничного слоя) и Фурье (по толщине ограждающих цилиндрических поверхностей)

$$q_l = Q/l = \Delta t_{i(i+1)} R_i^{-1} = \Delta t_{1(n+1)} R^{-1}_{1n}, \quad (1)$$

где q_l – удельная плотность теплового потока на единицу длины теплопровода в исследуемом сечении;

$\Delta t_{i(i+1)} = t_i - t_{i+1}$; $\Delta t_{1(n+1)} = t_1 - t_n$ – температурные напоры в составных элементах n устройства;

$R_{1n} = \sum_{i=1}^n R_i$ – суммарное термическое сопротивление всех элементов устройства.

Сопротивление пограничного слоя с коэффициентом теплообмена в трубе диаметром d_{1B}

$$R_1 = (\pi d_{1B} \alpha_{1B})^{-1}; \quad (2)$$

сопротивления ограждающих поверхностей (для элементов $i = 2 - n$ диаметрами от d_i до d_{i+1}) с коэффициентами теплопроводности λ_i

$$R_i = (2\pi\lambda_i)^{-1} \ln(d_{i+1}/d_i). \quad (3)$$

Изменение коэффициентов теплопроводности материала от температуры ($i = 2 - n$) учитывается линейной зависимостью [2]

$$\lambda_{i+1} = \lambda^0_{i+1} (1 + b_i t_{i+1}). \quad (4)$$

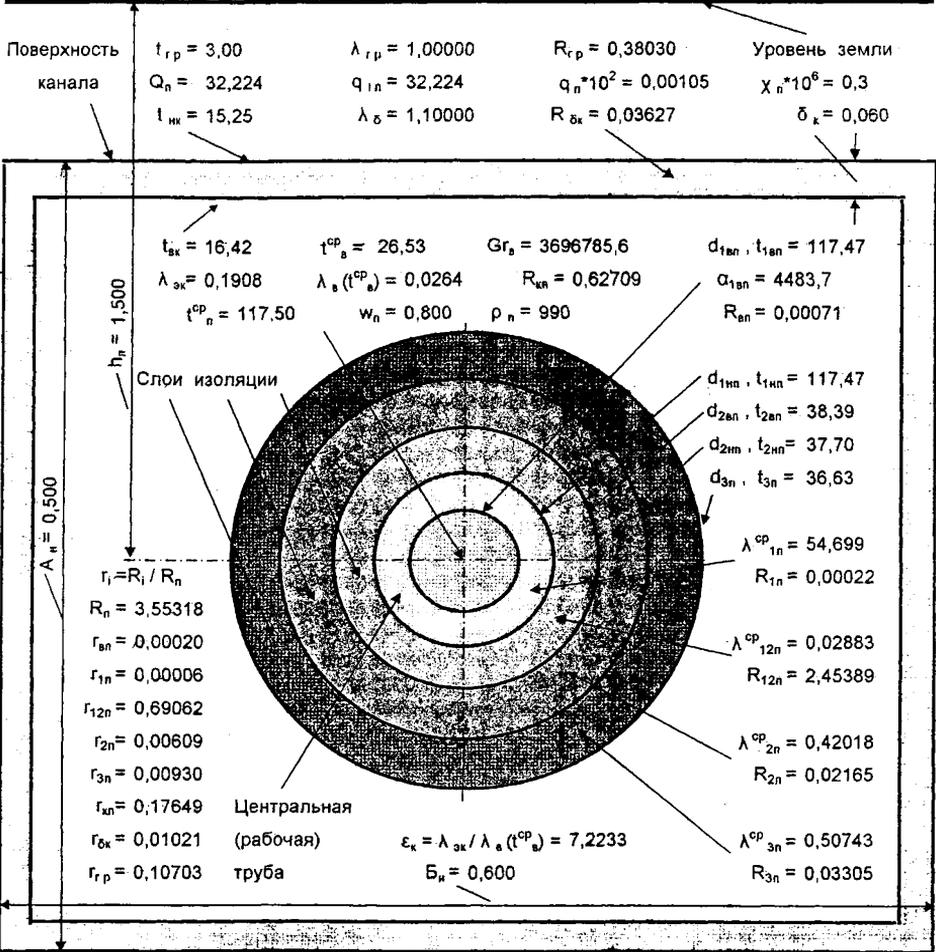
Согласно (1), температуру поверхностей на границе между двумя составляющими элементами теплопровода (например, слоями теплоизоляции) определим по выражению

$$t_{i+1} = t_i - q_l (2\pi\lambda_{i+1})^{-1} \ln(d_{i+1}/d_i). \quad (5)$$

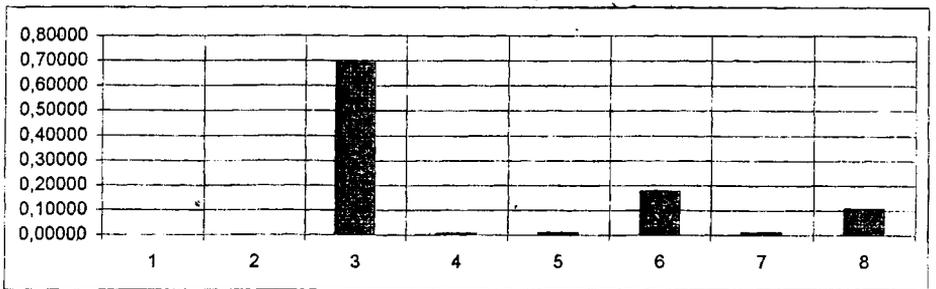
На основании совместного решения (4), (5) относительно t_{i+1} имеем

$$t_{i+1} = -0,5(b_i^{-1} - t_i) \pm [0,25(b_i^{-1} + t_i)^2 - (2\pi\lambda^0_i b_i)^{-1} q_l \ln(d_{i+1}/d_i)]^{0,5}. \quad (6)$$

Из анализа (6) следует, что при $b_i > 0$ перед корнем (квадратными скобками) следует учитывать знак плюс (+), а при $b_i < 0$ – знак минус (–). Для сохранения единого выражения по расчету t_{i+1} в обоих случаях ($b_i > 0$ или $b_i < 0$) в (6) перед корнем рекомендуется установить множитель $b_i (b_i^2)^{0,5}$. Это позволит производить расчет по данной формуле при условии, что перед корнем стоит только знак плюс независимо от значений $b_i > 0$ или $b_i < 0$. При $b_i = 0$ на основании (6), раскрывая по правилу



Графическое отображение составляющих $r_i = R_i / R_n$ теплового сопротивления потерям теплоты



Эл. сопрот.	1	2	3	4	5	6	7	8
Обозначение	$r_{вн}$	$r_{1нз}$	$r_{12нз}$	$r_{2нз}$	$r_{3нз}$	$r_{кп}$	$r_{ок}$	r_{gp}
Величина	0,00020	0,00006	0,69062	0,00609	0,00930	0,17649	0,01021	0,10703

Рис. 1. Расчетная схема одиночной трубы в канальной прокладке

Лопиталья неопределенность типа $\infty - \infty$, получаем приведенную выше формулу (5), в которой, согласно (4), при $b_i = 0$ $\lambda_{i+1} = \lambda_{i+1}^0$ и соответственно $\lambda_i = \lambda_i^0$, т. е.

$$\lim_{b_i \rightarrow 0} t_{i+1} = t_i - q(2\pi\lambda)^{-1} \ln(d_{i+1}/d_i). \quad (7)$$

Коэффициент теплообмена α_{1B} , входящий в (2), определяется на основании критериальной зависимости [2]

$$Nu = \alpha_{1B} d_{1B} / \lambda_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} Pr_c)^{0,25}. \quad (8)$$

Термическое сопротивление воздушного слоя в канальной прокладке учитывается на основании так называемого «эквивалентного» коэффициента теплопроводности [2] $\lambda_{эк} = \epsilon_k \lambda_b$, учитывающего интенсификацию теплообмена в камере за счет естественной конвекции по сравнению с передачей теплоты в неподвижной среде с теплопроводностью λ_b . Согласно опытным данным [2]

$$Nu = 0,18 (Gr_{ж} Pr_{ж})^{0,25}, \quad (9)$$

где в качестве линейного размера в критерии Грасгофа принимается толщина воздушного слоя между «горячей» и «холодной» поверхностями нагрева. В данном случае прямоугольные размеры камеры целесообразно представить в виде соответствующих эквивалентных диаметров: внутреннего – $d_{в эк}$ и наружного – $d_{н эк}$. На основании этого критерий $Gr_{ж}$, входящий в (9), представим в следующем виде:

$$Gr_{ж} = 9,81 [0,5(d_{в эк} - d_i)]^3 (t_i - t_{вк}) / \{ [273 + 0,5(t_i + t_{вк})] v_b^2 \}, \quad (10)$$

где $t_{вк}$ – температура стенки камеры изнутри; v_b – коэффициент кинематической вязкости воздуха в камере.

Исследуемый случай теплообмена основан на граничных условиях третьего рода, когда температура воды $t_{ж}$ и плотность потока теплотерь $q_s = q_l / (\pi d_{вн})$ через внутреннюю поверхность теплопровода по его длине изменяются одновременно при постоянной температуре окружающей среды ($t_{гр}$). Согласно закону Ньютона–Рихмана связь между значениями q_s и $t_{ж}$ носит линейный характер. Таким образом, закон падения температуры воды $t_{ж}(L)$ по длине теплопровода определяет также характер падения удельного теплового потока $q_s(L)$ и наоборот. Дальнейший анализ теплотерь по длине теплопровода основан на линейной зависимости $q_s(L) \sim q_l(L)$, что с достаточной точностью отвечает действительности. Тогда величину среднего теплового потока q_l на исследуемом участке L теплопровода определим как среднеарифметическую между этими показателями на входе $q_{вх}$ и выходе $q_{вых}$, т. е.

$$q_l = 0,5(q_{вх} - q_{вых}). \quad (11)$$

С другой стороны, величина теплотерь $\Delta Q = q_l L$ на исследуемом участке теплопровода определяется разностью энтальпий теплоносителя на входе и выходе

$$\Delta Q = q_l L = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} = C(G_{\text{вх}} t_{\text{вх}} - G_{\text{вых}} t_{\text{вых}}). \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) позволяют решить несколько задач по определению скорости падения температуры теплоносителя на исследуемом участке теплопровода и размеров исследуемого участка при заданных значениях температур теплоносителя на входе и выходе.

В табл. 1 и на рис. 1 даны результаты примерного расчета одиночного теплопровода в канальной прокладке. Исходными данными для расчета являются:

все геометрические показатели теплопровода;

температура воды на входе $t_{\text{п}}^{\text{сп}}$;

средние по длине участка $L_{\text{п}}$ плотность и скорость воды $w_{\text{п}}$;

коэффициенты теплопроводности составных элементов теплопровода даны для условий 0 °С и одновременно приведены коэффициенты их линейных аппроксимаций в зависимости от температуры b_i .

Все исходные данные приведены в табл. 1. Результаты расчета следующие:

массовый расход теплоносителя $G_{\text{п}} = 0,25\pi r_{\text{п}} d_{1\text{вп}}^2 w_{\text{п}}$;

время продвижения массового потока воды на исследуемом участке теплопровода $L_{\text{п}}$ от входа до выхода: $T_{\text{тс}} = L_{\text{п}}/w_{\text{п}}$, с; $T_{\text{тч}} = T_{\text{тс}}/3600$, ч;

тепловой поток $Q_{\text{сп}}$ на входе и выходе из теплопровода на участке $L_{\text{п}}$;

абсолютные значения теплотерь $\Delta Q_{\text{спL}} = Q_{\text{сп}}^{\text{вх}} - Q_{\text{сп}}^{\text{вых}}$ на участке $L_{\text{п}}$;

удельные значения теплотерь $q_{\text{лп}}$ в расчете на 1 м длины теплопровода на входе и выходе;

удельные значения теплотерь на участке $L_{\text{п}}$: $q_{\text{лпL}} = \Delta Q_{\text{спL}}/L_{\text{п}}$;

относительные теплотери на участке теплопровода длиной $L_{\text{п}}$, выраженные в процентах по отношению к тепловому потоку на входе: $\Delta q_{\text{спL}} \cdot 10^2 = 100\Delta Q_{\text{спL}}/Q_{\text{сп}}^{\text{вх}}$;

градиент (падение) температуры на участке теплопровода длиной $L_{\text{п}}$: $\delta_{\text{пL}} = [(t_{\text{п}}^{\text{сп}})_{\text{вх}} - (t_{\text{п}}^{\text{сп}})_{\text{вых}}] / L_{\text{п}}$;

геометрическая характеристика теплопровода: $\sigma_{\text{пL}} = 4L_{\text{п}}/d_{1\text{вп}}$;

критерий технической эффективности теплоизоляции теплопровода на участке $L_{\text{п}}$ [3]: $\chi_{\text{пL}} \cdot 10^6 = (\Delta q_{\text{спL}} \sigma_{\text{пL}}^{-1}) \cdot 10^6 = (\Delta q_{\text{спL}} \cdot 10^2) \cdot 10^4 / \sigma_{\text{пL}}$;

значения эквивалентных диаметров камеры теплопровода (внутреннего $d_{\text{в эк}}$ и наружного $d_{\text{н эк}}$);

все значения температур составных элементов теплопровода, начиная от внутренней стенки трубы ($t'_{1\text{вп}} = t_{1\text{вп}}$) и кончая температурой наружной поверхности камеры $t_{\text{нк}}$;

среднее значение температуры воздуха в камере, равное полусумме температур наружной изоляции трубопровода $t_{3\text{п}}$ и внутренней стенки камеры ($t_{\text{вк}}$), т. е. $t_{\text{в}}^{\text{сп}} = 0,5(t_{3\text{п}} + t_{\text{вк}})$;

критерий Грасгофа в камере теплопровода $Gr_{\text{ж}}$, вычисляемый по (10);

значение «эквивалентного» коэффициента теплопроводности камеры $\lambda_{\text{эк}}$, вычисленного на основании (9), (10);

средние (по толщине слоя) значения коэффициентов теплопроводности всех составных элементов теплопровода, начиная от материала центральной трубы $\lambda_{\text{п}}^{\text{сп}}$ и кончая стенкой камеры $\lambda_{\text{б}}^{\text{сп}}$;

коэффициент теплоотдачи в области пограничного слоя $\alpha_{1\text{б}}$, вычисляемый на основании (8);

**Анализ теплотерьеры одиночной трубы на участке длиной L_n (от входа до выхода),
размещенной в канальной прокладке**

Т 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Обозн.	$d_{1вп}$	$d_{1шт}$	$d_{2вп}$	$d_{2шт}$	$d_{3п}$	$t^{рп}$	$t_{гп}$	$\lambda^{\circ}_{1п}$	$\lambda^{\circ}_{12п}$	$\lambda^{\circ}_{2п}$	$\lambda^{\circ}_{3п}$
Вход						120,000					
Выход	0,100	0,108	0,170	0,180	0,200	117,498	3,000	50,0000	0,0300	0,4300	0,5000
Разм.	м	м	м	м	м	°С	°С	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)

Т 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ (продолжение 1)

Обозн.	λ°_{δ}	$\lambda^{\circ}_{гп} = \lambda_{гп}$	ρ_n	w_n	h_n	A_k	B_k	δ_k	$b_{1п}$	$b_{12п}$	$b_{2п}$
Вход											
Выход	1,1000	1,0000	990,0	0,80	1,500	0,500	0,600	0,060	0,00080	-0,00050	-0,00060
Разм.	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	кг/м ³	м/с	м	м	м	м	1/°С	1/°С	1/°С

Т 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ (продолжение 2)

Обозн.	$b_{3п}$	b_{δ}	L_n	G_n	$T_{с,гп}$	$Q_{сп}$	$t^{рп}$	$\delta_{рс}$	$t'_{1вп}$	δ_p
Вход						3125,2	120,000	-	119,977	1,0E-05
Выход	0,00040	0,00020	2000,0	6,220	2500,0	0,69	3060,0	117,498	5,1E-05	117,475
Разм.	1/°С	1/°С	м	кг/с	с	ч	кВт	°С	%	°С

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Обозн.	$\Delta Q_{снт}$	$q_{1п}$	$q_{1ш}$	$\Delta q_{снт} \cdot 10^2$	$\delta_{ш}$	$\sigma_{ш}$	$\chi_{ш} \cdot 10^6$	$t_{1вп}$	$t_{1шт}$	$t_{2вп}$	$t_{2шт}$
Вход		32,944					0,26066	119,977	119,969	39,099	38,386
Выход	65,17	32,224	32,584	2,09	0,00125	80000		117,475	117,468	38,394	37,696
Разм.	кВт	Вт/м	Вт/м	%	°С/м	-	-	°С	°С	°С	°С

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА (продолжение 1)

Обозн.	$t_{3п}$	$t_{вк}$	$t_{шк}$	$d_{гшк}$	$d_{вшк}$	$t^{рв}$	$G_{гв}$	$\lambda_{ж}$	$\lambda^{рп}_{1п}$	$\lambda^{рп}_{12п}$	$\lambda^{рп}_{2п}$
Вход	37,297	16,724	15,529	0,545	0,424	27,010	3737742,8	0,1916	54,7989	0,02881	0,42000
Выход	36,631	16,424	15,255	0,545	0,424	26,527	3696785,6	0,1908	54,6988	0,02883	0,42018
Разм.	°С	°С	°С	м	м	°С	-	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА (продолжение 2)

Обозн.	$\lambda^{рп}_{3п}$	$\lambda^{рп}_{\delta}$	$\alpha_{1вп}$	$R_{вп}$	$R_{1п}$	$R_{12п}$	$R_{2п}$	$R_{3п}$	$R_{шп}$	$R_{жк}$	$R_{гп}$
Вход	0,50757	1,10355	4524,5	0,00070	0,00022	2,45477	0,02165	0,03304	0,62450	0,03627	0,38030
Выход	0,50743	1,10348	4483,7	0,00071	0,00022	2,45389	0,02165	0,03305	0,62709	0,03627	0,38030
Разм.	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	Вт/(м ² ·К)	м·К/Вт	м·К/Вт	м·К/Вт	м·К/Вт	м·К/Вт	м·К/Вт	м·К/Вт	м·К/Вт

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА (продолжение 3)

Обозн.	$R_{п}$	$k_{12} = R^{-1}_{12}$	$R_{ш}$	$\lambda_{ш}$	$r_{вп}$	$r_{1п}$	$r_{12п}$	$r_{2п}$	$r_{3п}$	$r_{шп}$	$r_{жк}$
Вход	3,55147	0,28157	3,17046	0,08516	0,00020	0,00006	0,69120	0,00610	0,00930	0,17584	0,01021
Выход	3,55318	0,28144	3,17216	0,08511	0,00020	0,00006	0,69062	0,00609	0,00930	0,17649	0,01021
Разм.	м·К/Вт	Вт/(м·К)	м·К/Вт	Вт/(м·К)	-	-	-	-	-	-	-

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА (продолжение 4)

Обозн.	$r_{гп}$	$Pr_{ж}(t^{рп}_{п})$	$Pr_{г}(t'_{1вп})$	$\lambda_{п}(t^{рп}_{п})$	$\mu_{п}(t^{рп}_{п})$	$\nu_{п}(t^{рп}_{п})$	$Re_{ж}(t^{рп}_{п})$	$Nu_{ж}(t^{рп}_{п})$	$Pr_{г}(t^{рп}_{п})$	$\lambda_{п}(t^{рп}_{п})$	$\nu_{п}(t^{рп}_{п})$
Вход	0,10708	1,435	1,436	0,591	2,4E-05	2,3E-07	3,4E+05	7,7E+02	0,701	0,0265	1,6E-05
Выход	0,10703	1,468	1,469	0,591	2,4E-05	2,4E-07	3,4E+05	7,6E+02	0,702	0,0264	1,6E-05
Разм.	-	-	-	ккал/(м·ч·К)	кгс·с/м ²	м ² /с	-	-	-	Вт/(м·К)	м ² /с

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА (продолжение 5)

Т 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА (продолжение 5)						Константы				P_{10}	119,977
Обозн.	I_n	Q_n	$q_n \cdot 10^2$	σ_n	$x_n \cdot 10^6$	C	K_p	τ	g	P_{20}	119,977
Вход	1,000	32,944	0,0011	40,00	0,2635	4186,8	1,163	3,1416	9,81	P_{1c}	117,475
Выход		32,224	0,0011	40,00	0,2633	4186,8	1,163	3,1416	9,81	P_{2c}	117,475
Разм.	м	Вт	%	-	-	Дж/(кг·К)	Вт/ккал	-	м/с ²	P_{3c}	117,475

термические сопротивления всех элементов теплопровода, начиная от пограничного слоя $R_{вп}$ и кончая грунтом $R_{гп}$, а также суммарное значение

этих показателей в виде R_n и его обратной величины – коэффициента теплопередачи ($k_l = R_n^{-1}$) в расчете на единицу длины теплопровода;

относительные (по сравнению с суммарным значением R_n) величины термических сопротивлений всех элементов теплопровода, начиная от пограничного слоя ($r_{вп} = R_{вп}/R_n$) и кончая грунтом ($r_{гр} = R_{гр}/R_n$).

суммарное термическое сопротивление элементов теплопровода, зависящих от его конструкции, т. е. $R_{эи} = R_{1п} + R_{12п} + R_{3п} + R_{кп} + R_{ок}$;

коэффициент теплопроводности $\lambda_{эи} = (2\pi R_{эи})^{-1} \ln(d_{н\ эк}/d_{1вп})$, эквивалентный термическому сопротивлению $R_{эи}$.

Программой предусмотрена также возможность оценки теплопотерь при условии их постоянства на некотором заданном произвольно участке l (т. е. при граничных условиях второго рода), а именно:

абсолютные значения теплопотерь на участке теплопровода длиной l : $Q_n = q_n l$;

относительные теплопотери на участке теплопровода длиной l , выраженные в процентах по отношению к тепловому потоку на входе: $q_n \cdot 10^2 = 100 Q_n / Q^{вх}_{сн}$;

геометрическая характеристика участка теплопровода длиной l : $\sigma_n = 4l / d_{1вп}$;

критерий технической эффективности [3] теплоизоляции теплопровода на участке l : $\chi_n \cdot 10^6 = (q_n \sigma_n^{-1}) \cdot 10^6 = (q_n \cdot 10^2) \cdot 10^4 / \sigma_n$.

Строго говоря, показатели Q_n , $q_n \cdot 10^2$ и σ_n , вычисленные при граничных условиях второго рода, представляют лишь сугубо научный интерес для другого класса задач и при исследовании потерь теплоты в теплопроводах реальной конструкции (при граничных условиях третьего рода) могут послужить лишь дополнительным фактом в процессе анализа основных результатов расчета.

Значения критериев Прандтля $Pr_{ж}(t^{cp}_n)$, $(Pr_c(t'_{1вп}))$, коэффициентов теплопроводности $\lambda_n(t^{cp}_n)$ и динамической вязкости воды $\mu_n(t^{cp}_n)$ в диапазоне температур $t = 0-150$ °С и при давлении в диапазоне 0,6–4 МПа [4] вычисляются на основании полинома

$$Y = A_6 t^6 + A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0. \quad (13)$$

Коэффициент кинематической вязкости воды в данном случае определяется по формуле

$$v_n(t^{cp}_n) = [\mu_n(t^{cp}_n)]g/\rho_n. \quad (14)$$

Аналогичные теплофизические характеристики воздуха в камере [$Pr_v(t^{cp}_в)$, $\lambda_v(t^{cp}_в)$ и $v_v(t^{cp}_в)$] в диапазоне температур – 30–70 °С [4] при одной физической атмосфере (порядка 0,1 МПа) вычисляются на основании того же полинома (13).

Значения коэффициентов полинома, полученные на основании аппроксимации упомянутых теплофизических свойств воды и воздуха, приведены в табл. 2.

Значения коэффициентов полинома (13) для расчета теплофизических характеристик воды и воздуха

Коэффициент	Вода, t_n			Воздух, t_b		
	для $Pr_{ж}(t_n)$	для $\lambda_n(t_n) \cdot 10^2$, ккал/(м·ч·К)	для $\mu_n(t_n) \cdot 10^6$, кгс·с/м ²	для $Pr(t_b)$	для $\lambda_b(t_b) \cdot 10^2$, ккал/(м·ч·К)	для $\nu_b(t_b) \cdot 10^6$, м ² /с
A_6	$8,548 \cdot 10^{-12}$	$-2,3 \cdot 10^{-12}$	$1,079 \cdot 10^{-10}$	$-5,719 \cdot 10^{-14}$	0	0
A_5	$-4,742 \cdot 10^{-9}$	$1,059 \cdot 10^{-9}$	$-5,938 \cdot 10^{-8}$	$5,26 \cdot 10^{-12}$	0	0
A_4	$1,078 \cdot 10^{-6}$	$-1,838 \cdot 10^{-7}$	$1,338 \cdot 10^{-5}$	$2,077 \cdot 10^{-10}$	0	0
A_3	$-1,316 \cdot 10^{-4}$	$1,557 \cdot 10^{-5}$	$1,621 \cdot 10^{-3}$	$-6,267 \cdot 10^{-8}$	0	0
A_2	$9,615 \cdot 10^{-3}$	$-1,304 \cdot 10^{-3}$	$1,186 \cdot 10^{-1}$	$4,641 \cdot 10^{-6}$	0	0
A_1	$-4,464 \cdot 10^{-1}$	$1,718 \cdot 10^{-1}$	$-5,677$	$-3,143 \cdot 10^{-4}$	$7,718 \cdot 10^{-3}$	0,0878
A_0	1,289·10	4,9·10	$1,789 \cdot 10^2$	$7,076 \cdot 10^{-1}$	2,437	13,555

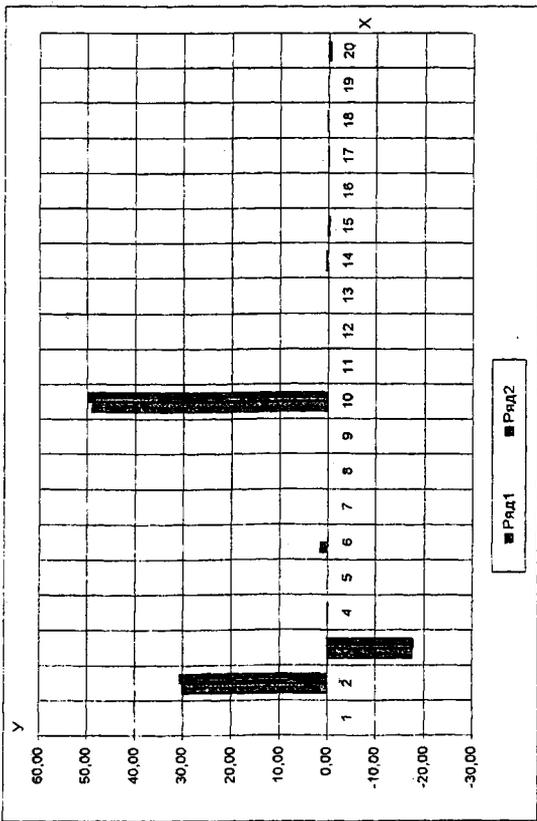
Гистограммы термических сопротивлений всех изолирующих элементов теплопровода, начиная от пограничного слоя со стороны теплоносителя до грунта, представлены на рис. 2.

Обращает внимание тот факт, что термические сопротивления воздушной камеры $r_{кп}$ и грунта $r_{гп}$ практически соизмеримы. Основное влияние на ограничение теплопотерь оказывает промежуточный слой теплоизоляции $r_{12п}$ с коэффициентом удельной теплопроводности $\lambda^{cp}_{12п}$. Это дает основание считать, что вопросы технико-экономического обоснования целесообразности строительства теплосетей в канальной прокладке требуют дальнейшего изучения. В связи с этим задача по выполнению пофакторного анализа аргументов, влияющих на величину теплопотерь в сетях, является актуальной.

Предлагаемое вниманию программное средство дает также возможность оценить влияние основных элементов конструкции теплопровода на его эффективность в плане теплопотерь. В качестве критериев таких оценок целесообразно использовать значения частных производных и частных дифференциалов (приращений) от функций Q_n и q_{in} по всем аргументам A (исходным данным), т. е. $\partial Q_n / \partial A$; $\partial q_{in} / \partial A$ и $d_A Q_n = (\partial Q_n / \partial A) \Delta A$; $d_A q_{in} = (\partial q_{in} / \partial A) \Delta A$. Результаты такого анализа для конструкции исследуемого теплопровода (рис. 1, табл. 1) приведены в виде гистограмм и расчетной таблицы на рис. 3. Значения частных производных и частных дифференциалов исследуемых функций Q_n и q_{in} представлены в процентах в виде комплексов: $\delta A_Q = 100(\partial Q_n / \partial A) / \sum [(\partial Q_n / \partial A)^2]^{0,5}$; $\delta A_q = 100(\partial q_{in} / \partial A) / \sum [(\partial q_{in} / \partial A)^2]^{0,5}$ и $d \delta A_Q = 100 d_A Q_n / \sum [(d_A Q_n)^2]^{0,5}$; $d \delta A_q = 100 d_A q_{in} / \sum [(d_A q_{in})^2]^{0,5}$. Показатели δA_Q и δA_q характеризуют скорость («чувствительность») изменения теплопотерь от исследуемых аргументов. Показатели $d \delta A_Q$ и $d \delta A_q$ характеризуют фактический «вклад» исследуемого аргумента на формирование величины теплопотерь при данной компоновке теплопровода.

Результаты анализа, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о том, что основное влияние на результирующий эффект (т. е. на величину теплопо-

Факторный анализ по частным производным



Факторный анализ по частным дифференциалам

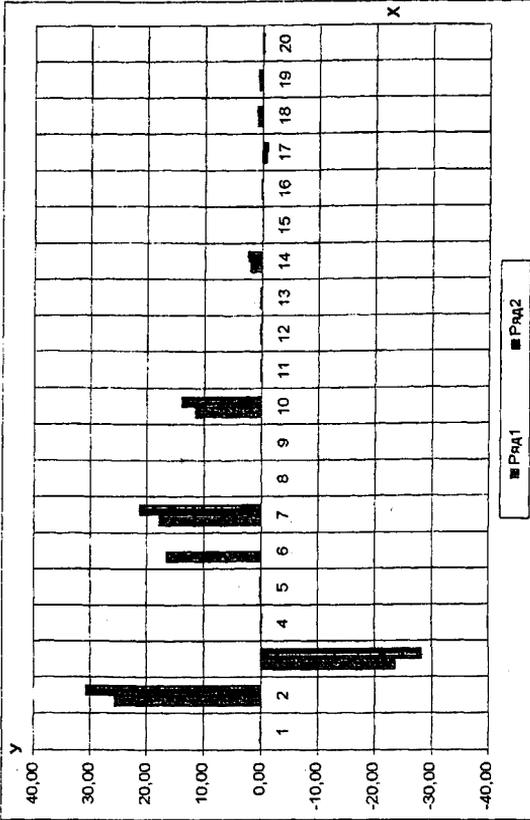
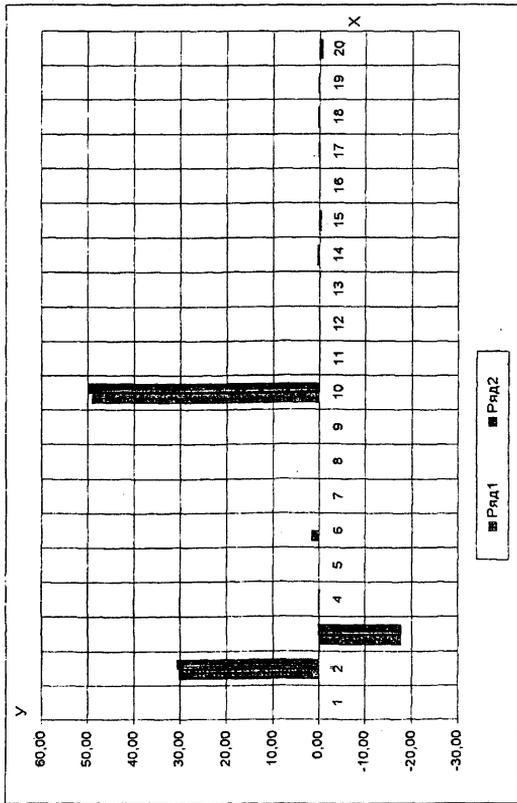


Рис. 2. Графические отображения в виде гистограмм относительных значений частных производных $(\partial Q_i/\partial A)$ и $(\partial Q_i/\partial \lambda)$ и частных дифференциалов $[dQ_i = (\partial Q_i/\partial A)\Delta A + (\partial Q_i/\partial \lambda)\Delta \lambda]$ функции Q_n и q_m (% от суммы их модулей) по исследуемым факторам-аргументам ($X = A$): $Y = \delta A_0 = 100 (\partial Q_i/\partial A) \Sigma (\partial Q_i/\partial A)^{-1/2}$ и $Y = \delta \lambda_0 = 100 (\partial Q_i/\partial \lambda) \Sigma (\partial Q_i/\partial \lambda)^{-1/2}$; $Y = \delta A_0 = 100 (\partial q_m/\partial A) \Sigma (\partial q_m/\partial A)^{-1/2}$ и $Y = \delta \lambda_0 = 100 (\partial q_m/\partial \lambda) \Sigma (\partial q_m/\partial \lambda)^{-1/2}$. Показатели δA_0 , $\delta \lambda_0$ и dQ_i , dQ_n характеризуют степени влияния независимых переменных (аргументов-факторов) на формирование расчетных значений теплотопотерь Q_i и q_m

Аргу-менты	№.п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Величина $K_{III} = K_{III}$	$d_{1,III}$	0,100	0,108	0,170	0,180	0,200	1,400	120,0	5,00	50,0000	0,0300	0,4300	0,5000	1,1000	1,0000	0,00105	0,800	1,800	0,500	0,600	0,060
	$d_{2,III}$	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Величина $\partial Q_i/\partial A$	$\Delta d_{1,III}$	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,360	0,000	0,1500	0,0015	0,0013	0,0015	0,0033	0,0030	0,00000	0,002	0,005	0,002	0,002	0,000
	$\Delta d_{2,III}$	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,360	0,000	0,1500	0,0015	0,0013	0,0015	0,0033	0,0030	0,00000	0,002	0,005	0,002	0,002	0,000
$\partial Q_i/\partial \lambda$	$d_{1,III}$	0,34	468,59	-274,63	-2,74	0,72	0,00	0,29	0,00	0,00	1067,75	0,65	0,89	0,44	5,51	-8,68	0,01	-1,21	3,98	2,51	-12,20
	$d_{2,III}$	0,02	30,06	-17,62	-0,18	0,05	1,49	0,02	0,00	0,00	48,92	0,03	0,04	0,02	0,25	-0,40	0,00	-0,06	0,18	0,11	-0,56
$\partial q_m/\partial A$	$\Delta d_{1,III}$	0,00	0,21	-0,20	0,00	0,00	0,14	0,15	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00
	$\Delta d_{2,III}$	0,00	0,15	-0,14	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\partial q_m/\partial \lambda$	$d_{1,III}$	0,02	25,58	-23,60	-0,25	0,07	16,44	17,74	0,00	0,00	11,56	0,10	0,16	0,18	1,99	0,00	0,00	-0,78	0,72	0,54	-0,26
	$d_{2,III}$	0,02	30,61	-28,24	-0,30	0,09	0,00	21,24	0,00	0,00	13,84	0,12	0,19	0,21	2,38	0,00	0,00	-0,94	0,86	0,65	-0,32

Факторный анализ по частным производным



Факторный анализ по частным дифференциалам

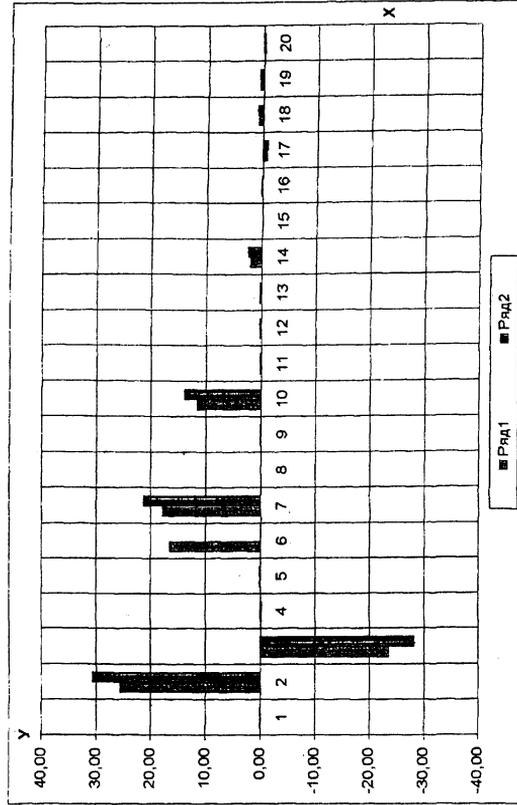


Рис. 3. Графические отображения в виде гистограмм относительных значений частных производных $(\partial Q_0/\partial A)$ и $(\partial q_0/\partial A)$ и частных дифференциалов $(\Delta Q_0 = (\partial Q_0/\partial A)\Delta A$ и $\Delta q_0 = (\partial q_0/\partial A)\Delta A$) функций Q_0 и q_0 (в % от суммы их модулей) по исследуемым факторам-аргументам ($X=A$): $Y = \delta A_Q = 100(\partial Q_0/\partial A)\Sigma[(\partial Q_0/\partial A)]^{0.5}$ и $Y = \delta A_q = 100(\partial q_0/\partial A)\Sigma[(\partial q_0/\partial A)]^{0.5}$. Показатели δA_Q , δA_q и $\delta \Delta Q_0$, $\delta \Delta q_0$ характеризуют степени влияния независимых переменных (аргументов-факторов) на формирование расчетных значений теплопогреб Q_0 и q_0 .

Аргу-менты	№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	d_{int}	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Величина	d_{int}	0,100	0,108	0,170	0,180	0,200	1,400	120,00	5,00	50,0000	0,3000	0,4300	0,5000	1,1000	1,0000	0,00105	0,800	1,800	0,500	0,600	0,060
$K_m = K^*_{m0}$	d_{int}	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Величина	Δd_{int}	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,360	0,015	0,1500	0,0009	0,0013	0,0015	0,0033	0,0030	0,0000	0,002	0,005	0,002	0,002	0,000
$\partial Q_0/\partial A$	ΔQ_0	4,03	532,63	-102,75	-31,35	-22,42	91,14	1,20	-1,22	0,00	87,42	5,35	7,30	3,66	45,40	-60,85	0,07	-9,91	31,51	19,87	-96,18
$\partial q_0/\partial A$	Δq_0	2,88	380,45	-73,39	-22,40	-16,02	0,86	0,86	-0,87	0,00	62,44	3,82	5,21	2,62	32,43	-43,47	0,05	-7,08	22,51	14,20	-68,70
Ряд1 δA_Q , %	δA_Q	0,35	46,14	-8,90	-2,72	-1,94	7,90	0,10	-0,11	0,00	7,57	0,46	0,53	0,32	3,93	-5,27	0,01	-0,86	2,73	1,72	-8,33
Ряд2 δA_q , %	δA_q	0,38	50,10	-9,67	-2,95	-2,11	0,00	0,11	-0,02	0,00	8,22	0,50	0,69	0,34	4,27	-5,72	0,01	-0,93	2,96	1,87	-9,05
d_{int}	d_{int}	0,00	0,17	-0,05	-0,02	-0,01	0,38	0,43	-0,02	0,00	0,08	0,01	0,01	0,01	0,14	0,00	0,00	-0,05	0,05	0,04	-0,02
d_{int}	d_{int}	0,00	0,12	-0,04	-0,01	-0,01	0,00	0,31	-0,01	0,00	0,06	0,00	0,01	0,01	0,10	0,00	0,00	-0,04	0,03	0,03	-0,01
Ряд1 $\delta \Delta Q_0$, %	$\delta \Delta Q_0$	0,08	11,60	-3,52	-1,14	-0,90	25,73	28,98	-1,23	0,01	5,29	0,46	0,74	0,81	9,15	-0,01	0,01	-3,60	3,18	2,40	-1,16
Ряд2 $\delta \Delta q_0$, %	$\delta \Delta q_0$	0,11	15,62	-4,74	-1,53	-1,22	0,00	39,01	-1,65	0,01	7,12	0,62	0,99	1,09	12,32	-0,02	0,02	-4,84	4,28	3,24	-1,57

потерь) оказывают толщина слоя изоляции (от $d_{1нп}$ до $d_{2вп}$) с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{12п} = 0,03$ Вт/(м · К), температура теплоносителя $t_{п}^{сп}$ и длина l исследуемого теплопровода. Остальные показатели вносят второстепенный «вклад» в формирование теплопотерь. Характер результатов анализа резко меняется при изменении только одного аргумента (рис. 3). В частности, при снижении коэффициента теплопроводности до уровня $\lambda_{12п} = 0,3$ Вт/(м·К) влияние этого фактора уменьшается и возрастает влияние температуры теплоносителя $t_{п}^{сп}$. Существенное значение обретают такие факторы, как теплопроводность грунта $\lambda_{гр}$, глубина заложения теплопровода $h_{п}$ и конструктивные характеристики камеры $A_{н}$, $B_{н}$ и $\delta_{к}$.

ВЫВОДЫ

1. Представлены основные методические рекомендации по разработке программного средства для расчета и анализа теплопотерь в теплопроводах.

2. Обоснована необходимость в практическом применении программных средств, позволяющих рассчитывать и анализировать процесс теплопотерь в теплопроводах при разработке их конструкций и в условиях эксплуатации.

3. Практическая ценность результатов анализа, получаемых с помощью предлагаемого к использованию программного средства, подтверждается примерными расчетами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. – М., 1982.
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М., 1973.
3. Байрашевский Б. А. Оценка эффективности работы теплосетей // Электрические станции. – 1988. – № 2. – С. 74–76.
4. Теплово́й расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. – М., 1973.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 19.09.2001