



DOI 10.5862/JEST.214.11
УДК 53.088.228

Ю.К. Атрошенко, И.П. Озерова, П.А. Стрижак

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО КОНТАКТА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Yu.K. Atroshenko, I.P. Ozerova, P.A. Strizhak

RESEARCH OF THE THERMAL CONTACT CONDITIONS INFLUENCE ON THE RESULTS OF SUPERFICIAL THERMOCOUPLES MEASUREMENTS

В работе приведены результаты численных исследований процессов теплопереноса в системе «измеряемая среда — поверхностный термоэлектрический преобразователь». С помощью разработанной модели теплопереноса выполнено исследование влияния на результаты измерений величины воздушного зазора между термоэлектрическим преобразователем и поверхностью тела, температура которого измеряется. Показано, что величина воздушного зазора оказывает существенное влияние на необходимую продолжительность нагрева чувствительного элемента (минимальное время измерений). Установлены предельно допустимые значения величин этих зазоров для измерений в реальной практике. Проведены эксперименты для оценки адекватности результатов численных исследований.

ТЕПЛОПЕРЕНОС; ТЕРМОПАРА; ТЕМПЕРАТУРА; ИЗМЕРЕНИЕ; ДЛИТЕЛЬНОСТЬ; ПОГРЕШНОСТЬ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

In operation results of numerical researches of the heat transfer processes are rendered in «the measured environment — the surface thermoelectric transformer» system. By means of the developed model of heat transfer research of influence on results of measurements of value of air gap between the thermocouple and a body surface is estimated (body temperature is measured). It is shown that the air gap value has an essential impact on the necessary duration of heating of a sensitive element (minimum time of measurements). Maximum permissible magnitudes of these gaps values for the measurements in real practice are set. Experiments to assess the numerical research results adequacy of are made.

HEAT TRANSFER, THERMOCOUPLE, TEMPERATURE, MEASUREMENT, DURATION, ERROR, MATHEMATICAL SIMULATION.

Введение

Температура — один из основных параметров, характеризующих состояние физических процессов и различных технологических объектов [1]. Температурные измерения используются в системах контроля и мониторинга оборудования и качества протекания технологических процессов в различных отраслях промышленности [2]. При этом для многих предприятий, как правило, контроль температуры играет определяющую роль в обеспечении качества технологических процессов и технико-экономических показателей производства в целом. Особенно следует выделить такие

направления, как энергетика, металлургия, машиностроение [3–5], а также пожарная безопасность, медицина [6–8] и другие.

Одними из наиболее распространенных контактных средств измерений температуры являются термоэлектрические преобразователи (ТЭП), принцип действия которых основан на эффекте Зеебека [9]. Стандарт [10] определяет 12 типов термопар. На практике, например, для измерения температуры в диапазоне от 70 до 1400 К наибольшее распространение получила довольно ограниченная группа термопар — типы ХК (*L*), ХА (*K*), ХКн (*E*). В качестве эталонных, как правило, используются термопары типов ПП (*R*) и ПП (*S*).

Независимо от области применения основное требование, предъявляемое к ТЭП, заключается в обеспечении максимальной точности измерений. Случайная погрешность, которая представляет наиболее трудно устранимую составляющую суммарной погрешности, может быть уменьшена путем прогнозирования оптимального времени нагревания чувствительного элемента и требуемых условий его теплового контакта с измеряемой средой.

Прогнозирование времени нагрева термопары может быть выполнено с помощью численного моделирования комплекса взаимосвязанных процессов теплопереноса в окрестности чувствительного элемента ТЭП. Решению таких задач с использованием балансных подходов и соответствующих методов посвящено достаточно много работ (например, [11–15]). Результатов решения сопряженных задач теплопереноса с учетом реальных условий эксплуатации ТЭП практически нет.

Настоящая работа посвящена вопросам прогнозирования необходимого времени нагревания (минимальная длительность измерений) чувствительных элементов ТЭП в различных условиях их теплового контакта с измеряемой средой.

Модель теплопереноса

При построении области решения задачи теплопереноса (в соответствии со стандартом [10]) рассматривалась система «воздух — защитный чехол — порошок — спай термопары» (рис. 1).

При численном моделировании считалось, что теплофизические характеристики материа-

лов чувствительного элемента ТЭП и воздуха не зависят от температуры.

Нагревание термопары производится от нагревательной поверхности, отделенной от чувствительного элемента ТЭП воздушным зазором (см. рис. 1). Начальная температура чувствительного элемента ТЭП составляет 293 К. Критерием окончания нагрева ТЭП является достижение температуры спая термопары значений, находящихся в пределах допускаемой погрешности.

Для термопреобразователей типа ПП(С) 2 класса допуска предел допускаемого отклонения от номинальной статической характеристики (НСХ) составляет $\pm 1,5$ К в диапазоне измеряемых температур от 273 до 873 К. Для термопар типа ХА (К) 1 класса допуска в диапазоне температур от 233 К до 648 К допускаемое отклонение от НСХ составляет $\pm 1,5$ К; в диапазоне измеряемых температур от 648 до 1273 К допускаемое отклонение не должно превышать $(\pm 0,004 \cdot (T - 273))$ К. Для ТЭП типа ХК (L) 2 класса допуска предел допускаемого отклонения составляет $\pm 2,5$ К в диапазоне измеряемых температур от 233 до 573 К и $(\pm 0,0075(T - 273))$ К при измерении температур от 573 до 1073 К [10].

Диаметр чувствительного элемента типичного ТЭП составляет 5 мм. Высота участка чувствительного элемента ТЭП ограничена значением 5 мм от нижней границы (см. рис. 1). Толщина воздушного зазора между нагревательным элементом и поверхностью чувствительного элемента варьировалась при проведении численного моделирования в диапазоне от 1 до 10 мм.

При моделировании использовалась следующая система дифференциальных уравнений в частных производных:

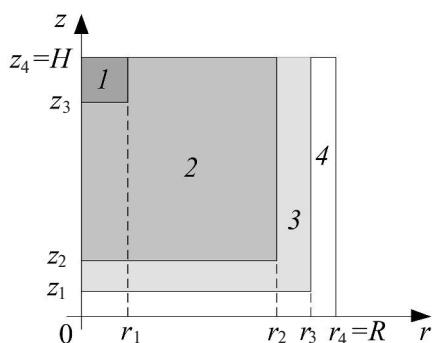


Рис. 1. Схема области решения задачи теплопереноса: 1 — спай термопары; 2 — порошок Al_2O_3 ; 3 — защитный чехол; 4 — воздушный зазор

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{при } t > 0, 0 < r < r_1, z_3 < z < H;$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{при } t > 0, 0 < r < r_2, z_2 < z < z_3$$

$$\text{и } t > 0, r_1 < r < r_2, z_3 < z < H;$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

при $t > 0$, $0 < r < r_3$, $z_1 < z < z_2$

и $t > 0$, $r_2 < r < r_3$, $z_2 < z < H$;

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

при $t > 0$, $0 < r < L$, $0 < z < z_1$

и $t > 0$, $r_3 < r < r_4$, $z_1 < z < H$.

Здесь r — радиальная координата, м; z — осевая координата, м; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); индексы означают: 1 — спай термпары, 2 — порошок окиси алюминия, 3 — защитный чехол, 4 — воздух.

Начальные условия:

$$t = 0; T = T_0; 0 < r < R; 0 < z < H, \quad (5)$$

где $T_0 = 293$ К — температура, соответствующая нормальным (комнатным) условиям.

Граничные условия решения задачи теплопереноса определены следующим образом.

На границе $r = R$ заданы условия первого рода:

$$r = R; T = T_r, \quad (6)$$

где T_r — температура нагревательного элемента.

Граничные условия на оси симметрии $r = 0$:

$$r = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

На границе $z = 0$ заданы условия первого рода:

$$z = 0; T = T_r. \quad (8)$$

Граничные условия на границе $z = H$:

$$z = H; \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

На границах «спай термпары — порошок Al_2O_3 », «порошок Al_2O_3 — защитный чехол», «защитный чехол — воздух» (см. рис. 1) принимались условия четвертого рода:

$$\begin{aligned} T_1(r_1, z) &= T_2(r_1, z); \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1}; \\ T_2(r_2, z) &= T_3(r_2, z); \end{aligned} \quad (10)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2}; \quad (11)$$

$$T_3(r_3, z) = T_4(r_3, z);$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=r_3}; \quad (12)$$

$$T_1(r, z_3) = T_2(r, z_3);$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=z_3} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z_3}; \quad (13)$$

$$T_2(r, z_2) = T_3(r, z_2);$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=z_2}; \quad (14)$$

$$T_3(r, z_1) = T_4(r, z_1);$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=z_1} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} \Big|_{z=z_1}. \quad (15)$$

Методы решения

Дифференциальные уравнения в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей. Решение линейных алгебраических уравнений, представляющих собой разностные аналоги дифференциальных уравнений, осуществлялось локально-одномерным методом. Для решения системы одномерных разностных уравнений использовался метод прогонки на основе неявной четырехточечной схемы [16]. Область решения задачи разбита на равномерную сетку, содержащую 240 узлов с шагом $2,5 \cdot 10^{-2}$ мм по каждой из координат. В целях повышения точности решения и уменьшения объема вычислений использовался неравномерный шаг по временной сетке (от 10^{-4} до 10^{-2} с). Так, при прогностических оценках характеристик исследуемого процесса применялся шаг 10^{-2} с, а в случае определения этих характеристик с удовлетворительной точностью (определяемой экспериментальными измерениями авторов и параметрами модели, в частности, числом Куранта) шаг по времени снижался и достигал минимального значения 10^{-4} с. Изменение шага по времени в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-2} с приводит к отклонению результатов моделирования в пределах 8–10 %.

Достоверность результатов численного моделирования оценивалась в соответствии с алгоритмами проверки консервативности используемых разностных схем [17–19]. Также проводились лабораторные эксперименты (результаты представлены далее).

Результаты и обсуждение

Исследования выполнены при следующих теплофизических характеристиках основных элементов системы, приведенной на рис. 1:

спай термопары типа ПП (S) — $\lambda_1 = 50,4$ Вт/(м·К), $C_1 = 139$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 20710$ кг/м³;

спай термопары типа ХК (L) — $\lambda_1 = 24,75$ Вт/(м·К), $C_1 = 713$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 8920$ кг/м³;

спай термопары типа ХА (K) — $\lambda_1 = 33,1$ Вт/(м·К), $C_1 = 768$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 8825$ кг/м³;

порошок Al_2O_3 — $\lambda_2 = 6,57$ Вт/(м·К), $C_2 = 850$ Дж/(кг·К), $\rho_2 = 1250$ кг/м³;

защитный чехол (сталь 12Х18Н10Т) — $\lambda_3 = 15$ Вт/(м·К), $C_3 = 462$ Дж/(кг·К), $\rho_3 = 7900$ кг/м³;

воздух — $\lambda_4 = 0,026$ Вт/(м·К), $C_4 = 1190$ Дж/(кг·К), $\rho_4 = 1,161$ кг/м³[20].

В табл. 1–3 приведены значения длительности нагревания чувствительного элемента (интервала времени, достаточный для достижения температур в пределах допустимой погрешности) ТЭП — ХА (K), ХК (L), ПП (S), определенные для различных значений величины воздушного зазора h .

Табл. 1–3 иллюстрируют нелинейный характер зависимости между величиной воздушного зазора и временем нагревания термопары. Он обусловлен нестационарным теплопереносом в ТЭП, представляющим гетерогенную систему (см. рис. 1). Выявленный эффект достаточно заметно проявляется при сопоставлении распределений температуры в области чувствительного элемента в начале (рис. 2, *a*) и по окончании (рис. 2, *b*) прогрева ТЭП.

По данным табл. 1–3 можно также сделать вывод, что увеличение толщины воздушного

Таблица 1

Продолжительность нагревания чувствительного элемента термопары типа ХК (L) в зависимости от величины воздушного зазора и измеряемой температуры

T, K	Продолжительность нагревания						
	$h = 1$ мм	$h = 2$ мм	$h = 3$ мм	$h = 4$ мм	$h = 5$ мм	$h = 6$ мм	$h = 7$ мм
300	49,976	78,534	119,107	179,278	267,586	396,958	586,577
350	150,959	236,805	359,488	541,652	809,216	1201,500	1776,600
450	199,748	313,271	475,624	716,726	1070,900	1590,100	2351,600
550	223,479	350,465	532,113	801,884	1198,200	1779,200	2631,200
850	234,506	367,430	557,800	840,726	1256,200	1865,400	2758,800

Таблица 2

Продолжительность нагревания чувствительного элемента термопары типа ХА (K) в зависимости от величины воздушного зазора и измеряемой температуры

T, K	Продолжительность нагревания						
	$h = 1$ мм	$h = 2$ мм	$h = 3$ мм	$h = 4$ мм	$h = 5$ мм	$h = 6$ мм	$h = 7$ мм
300	74,801	117,214	176,333	261,459	382,441	554,097	797,94
350	176,06	275,701	415,001	615,683	900,997	1305,900	1881,300
450	224,99	352,272	530,308	786,819	1151,500	1669,200	2404,800
550	248,78	389,517	586,395	870,062	1273,400	1845,900	2659,400
850	265,32	415,406	625,382	927,926	1358,100	1968,700	2836,300

Таблица 3

Продолжительность нагрева чувствительного элемента терморпары типа ПП (S)
в зависимости от величины воздушного зазора и измеряемой температуры

T, K	Продолжительность нагрева						
	$h = 1 \text{ мм}$	$h = 2 \text{ мм}$	$h = 3 \text{ мм}$	$h = 4 \text{ мм}$	$h = 5 \text{ мм}$	$h = 6 \text{ мм}$	$h = 7 \text{ мм}$
300	72,379	109,681	159,133	226,954	318,45	441,81	608,75
350	170,492	274,247	374,836	534,788	750,610	1041,700	1435,600
450	217,894	330,023	479,048	683,512	959,402	1331,500	1835,100
550	240,951	364,936	529,739	755,850	1061,000	1472,500	2029,400
850	277,138	419,732	609,3	869,390	1220,400	1693,700	2334,400

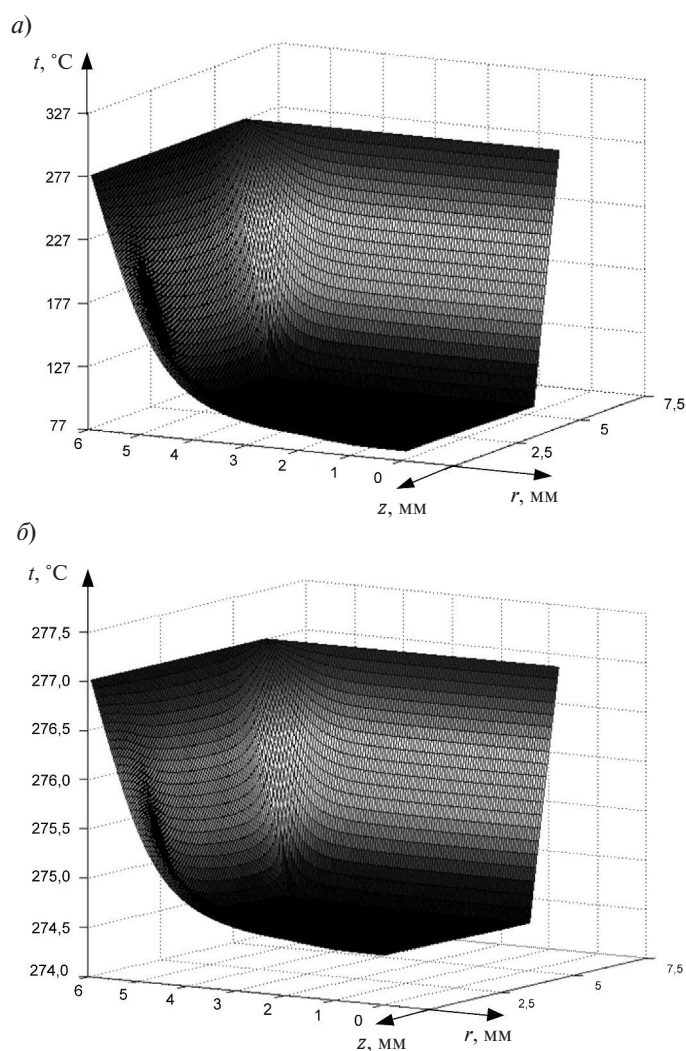


Рис. 2. Распределение температуры в области чувствительного элемента ТЭП типа ХК (L) при нагревании до температуры 550 К:
 $a - t = 15 \text{ с}$, $b - t = 223,5 \text{ с}$

зазора в значительной степени влияет на минимально необходимую величину продолжительности нагрева ТЭП.

Установленный эффект обусловлен существенно низкой по сравнению с элементами ТЭП теплопроводностью воздуха и, как следствие, повышением инерционности прогрева чувствительного элемента.

Данные табл. 1–3 свидетельствуют: несоблюдение длительности нагревания термопары при выполнении измерений приведет к существенному увеличению погрешности определения температуры. Так, например, значения $h \geq 3$ мм можно считать критическими, при которых вследствие ограниченных времен измерений в реальных условиях высока вероятность кратного роста случайных погрешностей.

Для оценки адекватности результатов численного моделирования выполнено несколько серий экспериментов.

Результаты экспериментов

Экспериментальное определение времени нагревания ТЭП проводилось с помощью стенда, схема которого показана на рис. 3. Экспериментальный стенд включает опытный образец ТЭП типа ХК (L) 1, сухоблочный калибратор температуры (нагреватель) 2 и многофункциональный калибратор 3.



Рис. 3. Схема экспериментального стенда:
1 — ТЭП; 2 — сухоблочный калибратор температуры; 3 — многофункциональный калибратор; 4 — секундомер

Сухоблочный калибратор 2 представляет моноблок, включающий термостатирующий блок и прецизионный измеритель-регулятор температуры. Термостатирующий блок изготовлен из бронзы и имеет форму цилиндра, ограниченного сверху и снизу охранными дисками, выполняющими функцию тепловых экранов. Для уменьшения температурных градиентов термостатирующий блок и охранные диски защищены теплоизоляционным материалом. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения температур калибратора определяется выражением

$$\pm \Delta = \left(0,05 + 0,06 \frac{T - 273}{100} \right), \quad (16)$$

где T — значение воспроизводимой температуры, К, [21].

Портативный калибратор 3 предназначен для измерения и воспроизведения сигналов напряжения постоянного тока и электрических сигналов термопар. Калибратор применяется в качестве эталонного средства измерений при поверке, калибровке и настройке измерительных приборов. Предел допускаемой основной погрешности калибратора при измерении выходного сигнала от ТЭП типа ХК (L) в диапазоне измерения температуры от 273 до 1063 К составляет 0,3 К [22].

Экспериментальное определение времени нагрева ТЭП проводилось в диапазоне от 400 до 800 К. Для уменьшения случайной погрешности выполнялись серии из 10 экспериментов при идентичных условиях. Графическое представление теоретических и экспериментальных данных приведено на рис. 4.

Относительное отклонение теоретических данных от экспериментальных не превышает 5 %. Этот результат позволяет сделать вывод о правомерности заключений, сделанных выше с использованием данных численного моделирования.

Описанная модель позволяет оценить достоверность и надежность измерительной информации, получаемой с помощью поверхностных ТЭП температуры в различных точках технологического тракта в реальных условиях их использования. С учетом того, что в зависимости от величины воздушного зазора длительность нагревания ТЭП до требуемых значений может достигать нескольких минут (см. табл. 1–3),

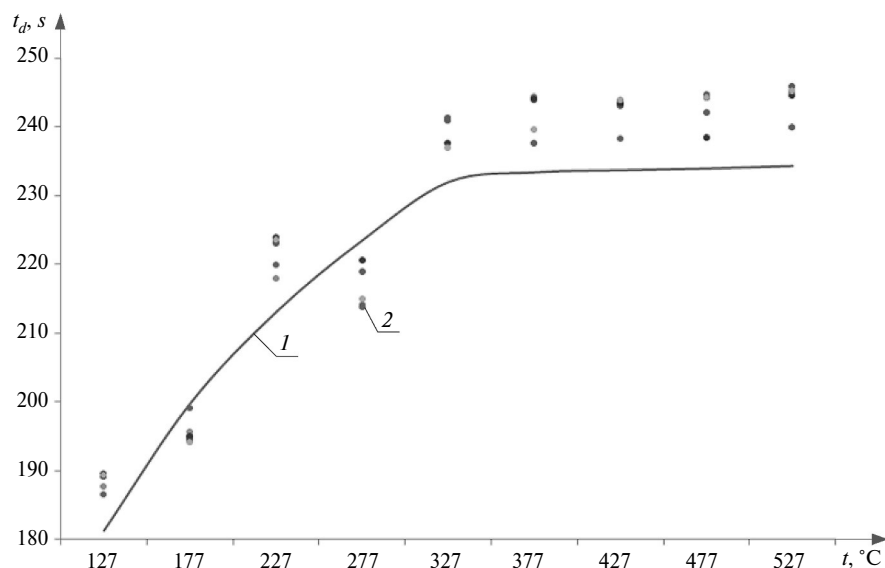


Рис. 4. Зависимость времени нагрева ТЭП типа ТХК (L) от значения измеряемой температуры: 1 — теоретическая зависимость с использованием модели (1)–(15); 2 — экспериментальные значения

альных производственных условиях зачастую не превышает и минуты, то разработанная модель позволит спрогнозировать значимость и последствия недостоверных измерений температуры.

Заключение

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что величина зазора между нагревателем и поверхностью чувствительного элемента термоэлектрического преобразователя оказывает существенное влияние на результаты измерения температуры. Увеличение зазора вы-

зывает практически кратное увеличение необходимой длительности нагрева термопары. Разработанную модель теплопереноса можно использовать при прогностических оценках необходимых и достаточных времен измерений, проводимых поверхностными ТЭП при различных условиях их теплового контакта с измеряемой средой.

Исследования выполнены за счет средств гранта РФФИ 14-08-00057. Алгоритмы для численных исследований разработаны при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета в рамках субсидии ВИУ (проект ВИУ_ЭНИН_2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьева Т.В., Мелькер А.И., Старовойтов С.А. Информация, энтропия, температура // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 2(147), Т. 1. С. 182–196;
2. Батухин А.Г., Кобылкин М.В. Автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения групп потребителей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2 (171). С. 68–72.
3. Каржавин В.А., Арнольдов М.Н. Повышение точности измерения температуры в ядерных реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Физика ядерных реакторов. 2008. № 3. С. 70–72.
4. Боровкова Т.В., Товстоног В.А., Елисеев В.Н. Оценка точности измерения температуры термопа-

рами при различных способах их размещения в объекте испытания // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 7. С. 19.

5. Кропачев Д.Ю., Гришин А.А., Масло А.Д. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий // Цветные металлы. 2013. № 4(844). С. 78–80.

6. Reznik S.V., Anuchin S.A., Prosuntsov P.V., Shulyakovskii A.V. Consideration of the procedural error for measuring contact sensor temperature during thermophysical studies // Refractories and Industrial Ceramics. 2009. Vol. 50, № 2. P. 114–117.

7. Farahmand K., Kaufman J.W. Experimental measurement of fine thermocouple response time in air // Experimental Heat Transfer. 2001. № 14. P. 107–118.

8. **Brundage A.L., Donaldson A.B., Gill W., Kearney S.P., Nicolette V.F., Yilmaz N.** Thermocouple Response in Fires, Part 2: Validation of Virtual Thermocouple Model for Fire Codes // *Journal of Fire Sciences*. 2011. № 29(213). P. 213–226.

9. **Герашенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К.** Температурные измерения: Справочник. Киев: Наук. Думка, 1989. 704 с.

10. **ГОСТ 6616–94.** Преобразователи термоэлектрические: общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1995. 15 с.

11. **Berntsson F.** An inverse heat conduction problem and improving shielded thermocouple accuracy // *Numerical Heat Transfer*. 2012. № 61. P. 754–763.

12. **Кузнецов Г.В., Мухаммадеев К.М.** Численная оценка погрешности измерений температур в условиях локального неидеального контакта спая термопары и материала // *Известия Томского политехнического университета*. 2009. Т. 314, № 4. С. 12–16.

13. **Borovkova T.V., Yeliseyev V.N., Lopukhov I.I.** Mathematical Modeling of Contact Thermocouple // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2008. Vol. 5, № 3. p. 274–277;

14. **Кузнецов Г.В., Мухаммадеев К.М.** Влияние неидеальности контакта спая термопары с материалом на погрешность температурных измерений в условиях перемещения поверхности материала // *Инженерная физика*. 2009. № 9. С. 29–32.

15. **Атрошенко Ю.К.** Численное исследование интегральных характеристик теплопереноса в типичных

термоэлектрических преобразователях // Сборник докладов XX МНПК студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии-2014». Томск: Изд-во ТПУ, 2014, С. 127–128.

16. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. Москва: Наука, 1989. 616 с.

17. **Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // *Химическая физика*. 2011. № 12. С. 35–42.

18. **Кузнецов Г.В., Глушков Д.О., Стрижак П.А.** Влияние формы локального источника энергии на условия зажигания структурно-неоднородного твердого конденсированного вещества // *Химическая физика и мезоскопия*. 2012. № 3. С. 334–341.

19. **Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Численное исследование процесса зажигания металлизированного конденсированного вещества внедренным в приповерхностный слой источником // *Химическая физика*. 2013. Т. 32. № 5. С. 55–61.

20. **Григорьев И.С., Мейлихов Е.З.** Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 1232 с.

21. Эталонный калибратор температуры «Элемер-КТ-650»: Паспорт технического средства. НПП «Элемер». М., 2011. 24 с.

22. Многофункциональный калибратор «Метран-510-ПКМ». Инструкция по эксплуатации / Метран. Челябинск. 2010. 54 с.

REFERENCES

1. **Vorobyeva T.V., Melker A.I., Starovoytov S.A.** Informatsiya, entropiya, temperatura. [Information, entropy, temperature]. *St. Petersburg State Politechnical Universiti Journal. Science and education. St. Petersburg: SPbGPU Publ.* 2012. № 2(147), Т. 1. P. 182–196. (rus.)

2. **Batukhin A.G., Kobylkin M.V.** Avtomatizirovannaya sistema regulirovaniya raskhoda teplonositelya dlya teplosnabzheniya grupp potrebiteley. [The automated heat carrier expense regulating system for heat supply of groups of consumers]. *St. Petersburg State Politechnical Universiti Journal. Science and education. St. Petersburg: SPbGPU Publ.* 2013. №2(171). P. 68–72. (rus.)

3. **Karzhavin V.A., Arnoldov M.N.** Povysheniye tochnosti izmereniya temperatury v yadernykh reaktorakh. [Increase of measurement accuracy of temperature in nuclear reactors]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Fizika yadernykh reaktorov*. 2008. № 3. S. 70–72. (rus.)

4. **Borovkova T.V., Tovstonog V.A., Yeliseyev V.N.** Otsenka tochnosti izmereniya temperatury termoparami pri razlichnykh sposobakh ikh razmeshcheniya v obyekte ispytaniya. [Assessment of measurement accuracy of temperature thermocouples at various ways of their placement

in object of test]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, № 7, S. 19. (rus.)

5. **Kropachev D.Iu., Grishin A.A., Maslo A.D.** Spoby operativnogo izmereniya temperatury rasplava metall-ov dlya nuzhd mashinostroitelnykh predpriyatiy. [Ways of expeditious measurement of melt temperature of metals for needs of machine-building enterprises]. *Tsvetnyye metally*. 2013, №4(844). S. 78–80. (rus.)

6. **Reznik S.V., Anuchin S.A., Prosuntsov P.V., Shulyakovskii A.V.** Consideration of the procedural error for measuring contact sensor temperature during thermo-physical studies. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2009. Vol. 50, № 2. P. 114–117.

7. **Farahmand K., Kaufman J.W.** Experimental measurement of fine thermocouple response time in air. *Experimental Heat Transfer*. 2001. № 14. P. 107–118. (rus.)

8. **Brundage A.L., Donaldson A.B., Gill W., Kearney S.P., Nicolette V.F., Yilmaz N.** Thermocouple Response in Fires, Part 2: Validation of Virtual Thermocouple Model for Fire Codes. *Journal of Fire Sciences*. 2011. № 29(213). P. 213–226.

9. **Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Ieremina A.K.** Temperaturnyye izmereniya. Spravochnik. [Temperature

measurements. Reference book.] Kiev: Nauk. Dumka, 1989. 704 p. (rus.)

10. **GOST 6616–94.** Preobrazovateli termoelektricheskoye: obshchiye tekhnicheskoye usloviya. [State standart specification. Converters thermoelectric: common technical specifications.] Moscow: Standartinform, 1995. 15 p. (rus.)

11. **Berntsson F.** An inverse heat conduction problem and improving shielded thermocouple accuracy. *Numerical Heat Transfer*. 2012. № 61. P. 754–763.

12. **Kuznetsov G.V., Mukhammadeiev K.M.** Chislennaya otsenka pogreshnosti izmereniy temperatur v usloviyakh lokalnogo neidealnogo kontakta spaya termopary i materiala. [Numerical error estimation of measurements of temperatures in the conditions of local imperfect contact of a thermocouple junction and material]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009. Vol. 314, № 4. S. 12–16. (rus.)

13. **Borokova T.V., Yeliseyev V.N., Lopukhov I.I.** Mathematical Modeling of Contact Thermocouple. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2008. Vol. 5. № 3. P. 274–277.

14. **Kuznetsov G.V., Mukhammadeyev K.M.** Vliyaniye neidealnosti kontakta spaya termopary s materialom na pogreshnost temperaturnykh izmereniy v usloviyakh peremeshcheniya poverkhnosti materiala. [Influence of not ideality of contact of a thermocouple junction with material on an error of temperature measurements in the conditions of movement of a surface of material]. *Inzhenernaya fizika*. 2009. № 9. S. 29–32 (rus.)

15. **Atroshenko Yu.K.** Chislennoye issledovaniye integralnykh kharakteristik teploperenosa v tipichnykh termoelektricheskikh preobrazovatelyakh. [Numerical research of integrated characteristics heattransfer in the typical thermoelectric converters.] Tomsk: TPU Publ., 2014. P. 127–128. (rus.)

16. **Samarskiy A.A.** Teoriya raznostnykh skhem. [Theory of difference schemes]. M.: Nauka, 1989. 616 p. (rus.)

17. **Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.** Chislennoye modelirovaniye tverdogaznogo zazhiganiya metallizirovannogo kondensirovannogo veshchestva nagretoy do vysokikh temperatur chastitsey. [Numerical model operation of solid-phase ignition of the metallized condensed substance the particle heated to high temperatures]. *Khimicheskaya fizika*. 2011. № 12. S. 35–42. (rus.)

18. **Kuznetsov G.V., Glushkov D.O., Strizhak P.A.** Vliyaniye formy lokalnogo istochnika energii na usloviya zazhiganiya strukturno-neodnorodnogo tverdogo kondensirovannogo veshchestva. [Influence of a form of a local energy source on conditions of ignition of the structural and nonuniform solid condensed matter]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2012. № 3. S. 334–341. (rus.)

19. **Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.** Chislennoye issledovaniye protsessa zazhiganiya metallizirovannogo kondensirovannogo veshchestva vnedrennyy v pripoverkhnostnyy sloy istochnikom. [Numerical research of process of ignition of the metallized condensed substance the source introduced in a near-surface layer]. *Khimicheskaya fizika*. 2013. Vol. 32. № 5. S. 55–61. (rus.)

20. **Grigoryev I.S., Meilikhov Ye.Z.** Fizicheskiye velichiny: Spravochnik. [Physical quantities: Reference book]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (rus.)

21. Etalonnyy kalibrator temperatury «Elemer-KT-650». Pasport tekhnicheskogo sredstva. [Standard calibrator of temperature «Elemer-KT-650». Passport of a technical tool.] / NPP «Elemer». M., 2011. 24 p. (rus.)

22. Mnogofunktsionalnyy kalibrator «Metran-510-PKM». Instruktsiya po ekspluatatsii. [Multipurpose calibrator «Metran-510-PKM». Maintenance instruction.] / Metran. Chelyabinsk: 2010. 54 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АТРОШЕНКО Юлиана Константиновна — ассистент Национального исследовательского Томского политехнического университета. 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: julie55@tpu.ru

ОЗЕРОВА Ирина Петровна — кандидат технических наук заведующая кафедрой Национального исследовательского Томского политехнического университета. 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ipozerova@mail.ru

СТРИЖАК Павел Александрович — доктор физико-математических наук профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета. 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pavelspa@tpu.ru

AUTHORS

ATROSHENKO Yuliana K. — National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050. E-mail: julie55@tpu.ru

OZEROVA Irina P. — National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050. E-mail: ipozerova@mail.ru

STRIZHAK Pavel A. — National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050. E-mail: pavelspa@tpu.ru