

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №2014/223 (код проекта 1567) и госзадания №9.1024.2014/К.*

Список литературы:

1. Meda L., Marra G., Galfetti L., Severini F., De Luka L. // Mater. Sci. and Eng. 2007. Vol. 27, № 5. P. 1393.
2. Luman J.R., Wehrman B., Kuo K.K., Yetter R.A., Masoud N.M., Manning T.G., Harris L.E., Bruck H.A. // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. Vol. 31. P. 2089.
3. Rossi C., Estève A., Vashishta P. // Journal Phys. Chem. Solids. 2010. Vol. 71, № 2. P. 57.
4. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. М.: Металлургия, 1987.
5. Сизов А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми газовыми струями. М.: Металлургия, 1991.
6. Rao C.N.R., Müller A., Cheetham A.K. Nanomaterials Chemistry: Recent Developments and New Directions. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007.
7. Xiao Y., Qi L., Zeng X., Chao Y., Yang F. // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 47, № 15. P. 156.
8. Порошок алюминиевый высокодисперсный АСД-1, АСД-4, АСД-6: Технические условия 48-5-28-87. ООО «СУАЛ-ПМ». г. Шелехов, 1987.
9. Ничипоренко О.С. Найда Ю.И., Медведовский А.Б. Распыливание металлических порошков Киев: Наукова думка, 1980. 237 с.
10. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 364 с.
11. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.

УДК 621.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ВРЕМЕНИ  
ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Атрошенко Ю.К., Озерова И.П., Стрижак П.А.  
Томский политехнический университет, Томск

Температура является одним из ключевых параметров, характеризующих состояние вещества. Сегодня температурные измерения используются для контроля и мониторинга состояния технологического оборудования и качества протекания технологических процессов во всех отраслях промышленности, таких как [1–4] металлургия, тепло-

энергетика, авиастроение, а также медицина, пожарная безопасность [5, 6] и другие сферы деятельности человека.

Среди средств измерения, характеризующих контактный метод измерения, наиболее распространенными являются термоэлектрические преобразователи, основанные на эффекте Зеебека [7]. Качество измерений, обеспечиваемое термопарами и характеризующееся точностью измерения и достоверностью информации, оказывает существенное влияние на качество регулирования и мониторинг качества технологического процесса.

Международным стандартом [8] определено восемь типов термопар. В России и странах СНГ для измерения температуры в диапазоне  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  широкое применение нашли термопары типа ХК ( $L$ ) и ХА ( $K$ ), в международной практике также используются термопары типа ХКн ( $E$ ). Применение прочих типов термопар, как правило, связано со специальными условиями выполнения измерений и/или диапазоном измеряемых температур. В частности, при калибровке ТЭП используются термопары типа ПП ( $S, R$ ).

В зависимости от области применения к термопарам могут предъявляться различные требования [9]. Основное требование связано с обеспечением максимальной точности измерений. При оценке погрешности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями важную роль играет время выполнения измерений.

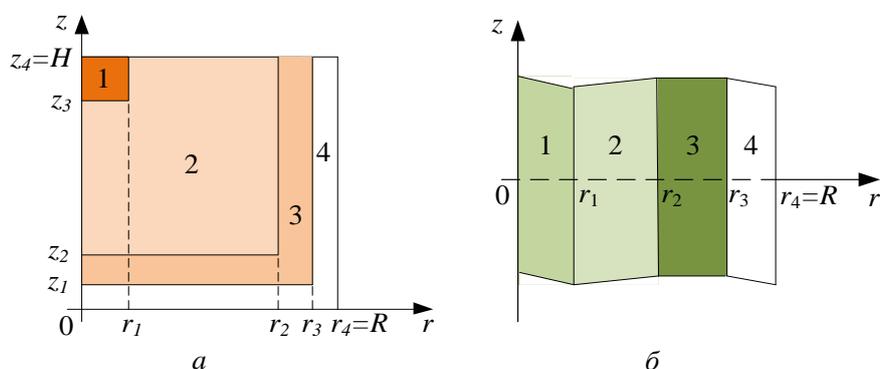


Рис. 1. Области решения двумерной (а) и одномерной (б) задач теплопереноса: 1 – спай термопары, 2 – порошок  $Al_2O_3$ , 3 – защитный чехол, 4 – воздушный зазор.

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 методов посвящено достаточно много работ (например, [2–3, 9–11]). Ре-

зультатов решения сопряженных задач теплопереноса с учетом реальных условий эксплуатации ТЭП практически нет.

Настоящая работа посвящена вопросам прогнозирования минимально необходимого времени нагревания чувствительных элементов ТЭП в различных условиях проведения измерений. С этой целью разработана следующая модель теплопереноса.

При построении области решения задачи теплопереноса рассматривалась система «воздух – защитный чехол – порошок – спай термопары». Геометрическое представление описанной неоднородной системы, представляющей область решения одномерной задачи теплопроводности, приведено на рис. 1, а. Область решения двумерной задачи теплопроводности представлена на рис. 1, б.

При численном моделировании приняты следующие допущения: теплофизические характеристики материалов чувствительного элемента ТЭП, а также теплофизические характеристики воздуха не зависят от температуры.

Нагревание термопары производится от нагревательной поверхности, отделенной от чувствительного элемента ТЭП воздушным зазором 5 (рис. 1). Начальная температура чувствительного элемента ТЭП составляет 20 °С. Критерием окончания нагрева ТЭП является достижение температуры спаи термопары значений, находящихся в пределах допускаемой (табл. 1) погрешности [12, 13].

*Таблица 1. Пределы допускаемых погрешностей ТЭП*

Тип ТЭП	Предел допускаемого отклонения от номинальной статической характеристики, °С
S (ПП) (2 класс допуска)	$\pm 1,5$ в диапазоне температур от 0 до 600 °С
K (ХА) (1 класс допуска)	$\pm 1,5$ в диапазоне температур от -40 до 375 °С; $\pm 0,004 \cdot t$ в диапазоне температур от 375 до 1000 °С
L (ХК) (2 класс допуска)	$\pm 2,5$ в диапазоне температур от -40 до 300 °С; $\pm 0,0075 \cdot t$ в диапазоне температур от 300 до 800 °С

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

Двумерная математическая модель процесса теплопереноса для чувствительного элемента ТЭП (рис. 1, а) описывается системой дифференциальных уравнения в частных производных:

$$C_1\rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$t > 0, 0 < r < r_1, z_3 < z < H;$$

$$C_2\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$t > 0, 0 < r < r_2, z_2 < z < z_3;$$

$$t > 0, r_1 < r < r_2, z_3 < z < H;$$

$$C_3\rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

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

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

$$C_4\rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

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

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

Здесь  $r$  – радиальная координата, м;  $z$  – осевая координата, м;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); индексы: 1 – спай термопары, 2 – порошок окиси алюминия, 3 – защитный чехол, 4 – воздух.

Начальные условия определяют распределение температуры в чувствительном элементе ТЭП в начальный момент времени:  $t=0$ ;  $T=T_0$ ,  $0 < r < R$ ,  $0 < z < H$ , где  $t_0=20$  °С – температура, соответствующая нормальным условиям.

Граничные условия решения задачи теплопереноса определены следующим образом. На границе  $r=R$  заданы граничные условия первого рода:  $r=R$ ,  $T=T_p$ , где  $T_p$  – температура нагревательного элемента.

Граничные условия на оси симметрии  $r=0$ :

$$r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

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

$$z = 0; T = T_r \quad (6)$$

Граничные условия на границе  $z=H$ :

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

Одномерная модель теплопереноса описывается аналогичной системой дифференциальных уравнений без учета нагревания вдоль оси  $z$ .

Приведенные системы дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей [14]. Решение линейных алгебраических уравнений, представляющих собой разностные аналоги дифференциальных уравнений, осуществлялось локально-одномерным методом [14]. Для решения системы одномерных разностных уравнений использовался метод прогонки на основе неявной четырехточечной схемы [14, 15].

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  $10^{-4}$  с до  $10^{-2}$  с).

Достоверность результатов численного моделирования оценивалась в соответствии с алгоритмами проверки консервативности используемых разностных схем [16–18]. Также проводились экспериментальные измерения (результаты приведены далее).

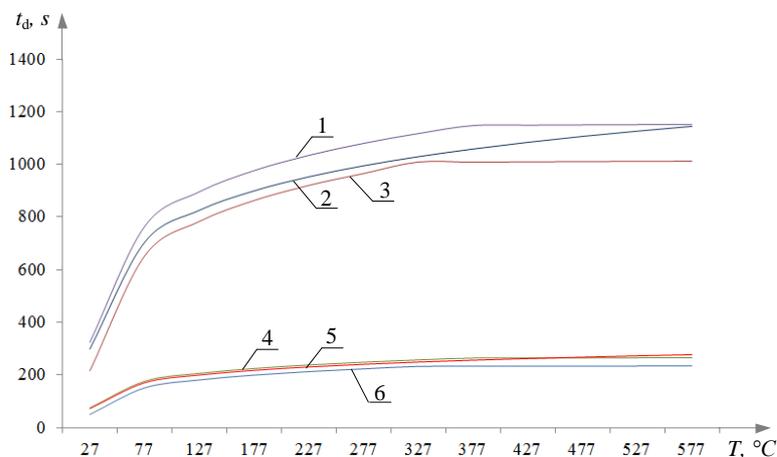


Рис. 2. Зависимости длительности нагрева чувствительных элементов ТЭП: одномерная модель (1: тип ХА (К), 2: тип ПП (S), 3: тип ХК (L)); двумерная модель (4: тип ХА (К), 5: тип ПП (S), 6: тип ХК (L)).

Математическое моделирование проводилось с учетом следующих теплофизических параметров элементов области решения задачи [19–21]: спай термопары типа ХА (К):  $\lambda_1=33,1$  Вт/(м·°С),  $C_1=768$  Дж/(кг·°С),  $\rho_1=8825$  кг/м<sup>3</sup>; спай термопары типа ПП (S):  $\lambda_1=50,4$  Вт/(м·°С),  $C_1=139$  Дж/(кг·°С),  $\rho_1=20710$  кг/м<sup>3</sup>; спай термопары типа ХК (L)  $\lambda_1=24,75$  Вт/(м·°С),  $C_1=713$  Дж/(кг·°С),  $\rho_1=8920$  кг/м<sup>3</sup>; порошок  $Al_2O_3$ :  $\lambda_2=6,57$

Вт/(м·°С),  $C_2=850$  Дж/(кг·°С),  $\rho_2=1250$  кг/м<sup>3</sup>; стальной защитный чехол:  $\lambda_3=15$  Вт/(м·°С),  $C_3=462$  Дж/(кг·°С),  $\rho_3=7900$  кг/м<sup>3</sup>; воздух:  $\lambda_4=0,026$  Вт/(м·°С),  $C_4=1190$  Дж/(кг·°С),  $\rho_4=1,161$  кг/м<sup>3</sup> [19-21].

Для иллюстрации результатов выполненных исследований процесса нагревания чувствительного элемента на рис. 2 приведены зависимости длительности нагревания ( $t_d$ ) чувствительного элемента различных типов термоэлектрических преобразователей – ХА (К), ХК (L), ПП (S), определенные с помощью описанных моделей.

Для исследуемых термопар зависимость минимально необходимой длительности нагревания термопары носит нелинейный характер. Незначительные изменения величины времени нагревания ТЭП типа ХК (L) для температуры более 300 °С, а для ХА (К) – более 375 °С обусловлены тем, что допускаемое отклонение от номинальной статической характеристики (НСХ) для указанных ТЭП при более высоких температурах носит не постоянный характер, а зависит от измеряемой температуры. Для термопары типа ПП (S) длительность нагревания непрерывно возрастает в расчетном диапазоне температур. Это связано с тем, что при работе с температурами, не превышающими 600 °С, допускаемое отклонение от НСХ для указанной термопары постоянно.

Результаты, полученные с помощью одномерной (рис. 1, б) модели, существенно отличаются от результатов, определенных с помощью двумерной (рис. 1, а) модели. Значения времени нагревания чувствительного элемента ТЭП, определенные на одномерной модели, более чем в 4 раза превышают значения, полученные с помощью двумерной модели. Это обусловлено тем, что такая модель не учитывает нагревание чувствительного элемента со стороны нижней границы. В этом случае одномерная модель может быть использована для прогнозирования времени нагрева термоэлектрических преобразователей, помещенных в печи, имеющие достаточно большую длину нагревательной камеры. На практике ТЭП могут применяться для погружного измерения температуры среды. В этих условиях для прогнозирования необходимой длительности нагревания целесообразно использовать двумерную математическую модель процесса нагревания чувствительного элемента.

Прогнозирование времени нагревания, необходимого для минимизации погрешности от «неполного» контакта ТЭП с нагретой поверхностью, является важным аспектом при планировании эксперимента. Теоретически определенные зависимости с помощью численного моделирования для термопара типа К приведены на рис. 3.

Полученные зависимости для термопар типов ХК (L) и ПП (S) аналогичны приведенным на рис. 3. Зависимость между величиной

воздушного зазора и временем нагревания термопары носит нелинейный характер. Увеличение толщины воздушного зазора в значительной степени влияет на минимально необходимую величину продолжительности нагрева ТЭП. Анализ рис. 3 показывает, что несоблюдение длительности нагревания термопары при выполнении измерений приведет к существенному увеличению погрешности определения температуры.

Одним из источников погрешности измерительных преобразователей является изменение структуры и характеристик материалов – элементов чувствительного элемента ТЭП (вследствие его длительной эксплуатации, механических повреждений и других способствующих процессов). В частности, длительная эксплуатация ТЭП вызывает не только изменение термоэлектрических свойств термоэлектродов, но также может привести к изменению качественного состава одного из элементов термоэлектрического преобразователя – порошка окиси алюминия.

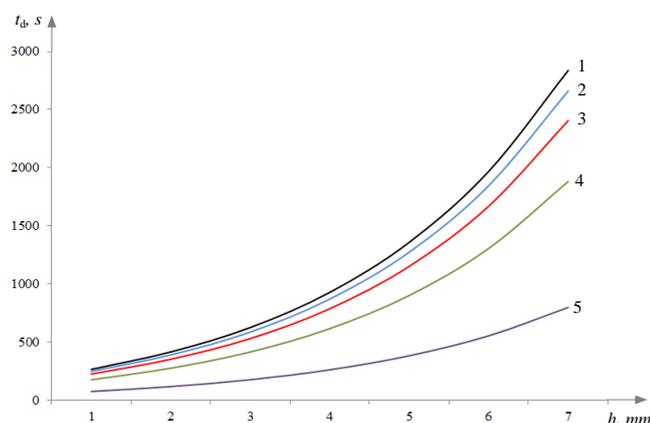


Рис.3. Зависимости длительности нагревания чувствительного элемента ТЭП типа ХК ( $L$ ) от величины воздушного зазора между чувствительным элементом и нагревательным элементом: 1:  $T=577\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2:  $T=277\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3:  $T=177\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4:  $T=77\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5:  $T=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В настоящей работе исследование влияния изменения теплофизических характеристик порошка, вызванное изменением его качественного состава, при численном моделировании проводилось путем изменения соотношения «порошок – воздух» в области 3 (рис. 1, а). Указанное соотношение характеризуется коэффициентом пористости порошка  $\varphi$ . При  $\varphi=1$  воздух в области 3 (рис. 1, а) отсутствует. В качестве минимального  $\varphi$  принималось значение 0,2, так как в практике эксплуатации ТЭП даже при длительных сроках работы и механических повреждениях снижение  $\varphi$  до таких значений маловероятно [1–7].

При увеличении доли порошка в области 3 (рис. 1, а) время нагрева чувствительного элемента ТЭП уменьшается на 10–20 %. Изменение

скорости нагрева с увеличением доли порошка осуществляется по нелинейному закону. Этот результат иллюстрирует, что теплофизические характеристики заполняющего вещества в значительной степени оказывают влияние на время нагрева чувствительного элемента ТЭП.

При планировании и проведении измерений с помощью термоэлектрических преобразователей учет возможного изменения теплофизических характеристик материалов – элементов конструкции ТЭП – позволит снизить погрешности, связанные с длительными сроками эксплуатации измерительных преобразователей.

Разработаны модели теплопереноса, позволяющие прогнозировать продолжительность нагревания чувствительного элемента типичных ТЭП, необходимую для установления показаний ТЭП в пределах допускаемой погрешности. Адекватность разработанных моделей подтверждена экспериментальными данными. Установлено, что величина зазора между нагревателем и чувствительным элементом оказывает существенное влияние на продолжительность нагревания термометра. Сделан вывод о том, что при наличии воздушного зазора между термометром и нагревателем продолжительность выполнения измерений играет важную роль и в значительной степени способствует уменьшению погрешности измерений. Также выявлено влияние изменения физических свойств основных компонентов ТЭП на результаты измерений.

Разработанная модель позволяет оценить надежность и достоверность результатов измерения температуры в типичных точках технологического тракта термоэлектрическими преобразователями в реальных условиях их использования. Если учитывать, что времена прогрева ТЭП до требуемых значений могут достигать нескольких минут, а времена развития нештатных ситуаций на реальных производствах довольно часто не превышают и минуты, то с использованием созданных моделей возможно спрогнозировать значимость и последствия недостоверных измерений температуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 14–08–00057).*

#### Список литературы:

1. René J. Moreau Measurement and Control in Liquid Metal Processing (Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1987)
2. S.V. Reznik, S.A. Anuchin, P.V. Prosuntsov, A.V. Shulyakovskii, Refractories and Industrial Ceramics **50**, 114 (2009)
3. T.V. Borovkova, V.N. Yeliseyev, I.I. Lopukhov, Physics of Particles and Nuclei Letters **5**, 274 (2008)
4. D.Yu. Erak, V.A. Nikolaenko, Atomic Energy **105**, 187 (2008)

5. K. Farahmand, J.W. Kaufman, *Experimental Heat Transfer* **14**, 107 (2001)
6. A.L. Brundage, A.B. Donaldson, W. Gill, S.P. Kearney, V.F. Nicolette, N. Yilmaz, *Journal of Fire Sciences* **29**, 213 (2011)
7. T.-W. Lee, *Thermal and Flow Measurements* (CRC Press, USA, 2008)
8. IEC 60584-1. International standard. Thermocouples. Part 1: Reference tables, 1995
9. J.W. Woolley, K.A. Woodbury, *Heat Transfer Engineering* **32**, 811 (2011)
10. F. Berntsson, *Numerical Heat Transfer* **61**, 754 (2012)
11. K.A. Woodbury, A. Gupta, *Inverse Problems in Science Engineering* **16**, 21 (2008)
12. IEC 60584-2. International standard. Thermocouples. Part 2: Tolerances, 1989
13. ГОСТ 6616-94. Термоэлектрические преобразователи: общие технические условия, 1995
14. A.A. Samarskii, *The Theory of Difference Schemes* (Marcel Dekker Inc., USA, 2001)
15. A. Belmiloudi, *Heat Transfer. Mathematical Modelling, Numerical Methods and Information Technology* (InTech, Vienna, 2011)
16. G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Int. J. Heat Mass Tran.* **53**, 923 (2010)
17. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Russ. J. Phys. Chem. B* **7**, 269 (2013)
18. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Adv. Mech. Eng.* **2014**, 764537 (2014)
19. Н.Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей* (Старс, Москва, 2006)
20. P.A. Kinzie, *Thermocouple Temperature Measurement* (Wiley-Interscience Publ., New York, 1973)
21. R. Hultgren, *Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys* (Amer. Soc. Metals, Ohio, 1973)

*УДК 662.62*

## **ИСПАРЕНИЕ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ СПИРТА В МИНИКАНАЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ВОЗДУХА**

Афанасьев И.А., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.

Томский политехнический университет, Томск

E-mail: [co0p@sibmail.com](mailto:co0p@sibmail.com)

В настоящее время усиливается интерес к капиллярной гидродинамике и тепломассообмену в микросистемах. Это связано с миниатюризацией устройств, развитием медицины, электроники, космической и энергетической промышленности [1].

Тонкий слой жидкости, увлекаемый потоком газа в мини- и микроканалах, является перспективным способом отвода значительных тепловых потоков поэтому может быть использован для охлаждения микроэлектронного оборудования [2,3,4]. Большая часть исследований направлена на изучение гидродинамики жидкости и газа в мини- и микроканалах. Тепло- массоперенос при течении двухфазных потоков изучен слабо [5-9]. Отсюда следует важность систематического