
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 536.532

Л. Ф. Жуков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: zhukov@i.com.ua

А. Л. Гончаров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: alexgoncharov51@gmail.com

Д. А. Петренко, аспирант, e-mail: dima-petrenko@meta.ua

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СМЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ИНЕРЦИОННОСТЬ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ МЕТОДОМ ПОГРУЖЕНИЯ

Установлено, что переходный процесс погруженного в металлический расплав термоэлектрического сменного преобразователя ТСП-Ш качественно эквивалентен идентичному нагреву однородного цилиндрического тела в регулярном тепловом режиме I рода. Время установления термодинамического равновесия между рабочим контактом термоэлектрического преобразователя и расплавом определяется материалами и конструкцией погружной части термометра, а также условиями измерений. Овальный рабочий конец ТСП-Ш ускоряет установление термодинамического равновесия в 1,9 и 3,0 раза соответственно, по сравнению с круглой формой и традиционной скруткой. При уменьшении диаметра электроизолятора термоэлектродов от 5 до 4 и 3 мм время установления термодинамического равновесия дополнительно снижается в 1,25 и 1,5 раза соответственно.

Ключевые слова: регулярный тепловой режим I рода, теплообмен, теплопроводность, показатель термической инерции, постоянная времени, время установления показаний, термодинамическое равновесие, термоэлектрический преобразователь, термоэлектрический сменный преобразователь погружения ТСП-Ш, термоэлектрический термометр.

Встановлено, що перехідний процес зануреного в металевий розплав термоелектричного змінного перетворювача ТЗП-Ш є якісно еквівалентним ідентичному нагріванню однорідного циліндричного тіла в регулярному тепловому режимі I роду. Час встановлення термодинамічної рівноваги між робочим контактом термоелектричного перетворювача і розплавом визначається матеріалами і конструкцією занурюваної частини термометра, а також умовами вимірювань. Овальний робочий кінець ТЗП-Ш прискорює встановлення термодинамічної рівноваги 1,9 в і 3,0 рази відповідно, порівняно з круглою формою і традиційною скруткою. При зменшенні діаметра електроізолятора термоелектродів від 5 до 4 та 3 мм час встановлення термодинамічної рівноваги додатково зменшується в 1,25 та 1,5 разів відповідно.

Ключові слова: регулярний тепловий режим I роду, теплообмін, теплопровідність, показник термічної інерції, час встановлення показань, термодинамічна рівновага, термоелектричний перетворювач, термоелектричний змінний перетворювач занурення ТЗП-Ш, термоелектричний термометр.

It was determined that transient process of thermoelectrical changeable transducer TCT-P placed

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

into metal melt is qualitatively equal to identical heating of uniform cylindrical body in regular thermal regime of the I kind. The setting time of thermodynamic equilibrium between working contact of thermoelectric transducer and melt is determined by materials and construction of immersible part of thermometer and conditions of measurements. Oval working end of TCT-P accelerates setting of thermodynamic equilibrium in 1,9 and 3,0 times, respectively. When diameter of thermoelectrodes electrical insulator decreases from 5 to 4 and 3 mm the setting time of thermodynamic equilibrium additionally decreases in 1,25 and 1,5 times, respectively.

Keywords: *regular thermal regime of the I kind, heat exchange, heat conductivity, index of heat inertia, setting time, thermodynamic equilibrium, thermoelectrical transducer, thermoelectrical changeable immersion transducer TCT-P, thermoelectrical thermometer.*

Термоэлектрические термометры погружения являются лучшим инструментом для периодических кратковременных измерений температуры металлических расплавов в металлургических печах и агрегатах и на сегодня не имеют альтернативы. Метод погружения предусматривает установление термодинамического равновесия между рабочим контактом термоэлектрического преобразователя и термометрируемым расплавом. Требуемое равновесие, в свою очередь, определяет специфические трудности контактных измерений, возрастающие с повышением температуры и химической активности расплавов, а также длительности погружения. Эти трудности связаны с выбором материалов и конструкции погружной части термоэлектрических термометров, в том числе для термоэлектродов термоэлектрических преобразователей, а также защитной и электроизолирующей арматуры. Методические погрешности любых контактных, в том числе погружных, измерений связаны с несовершенством требуемого термодинамического равновесия и возрастают при повышении температуры вследствие увеличения температурных градиентов и тепловых потоков. При измерениях средних и низких температур методические погрешности в основном определяются плохим тепловым контактом и посторонними тепловыми воздействиями.

Время установления термодинамического равновесия зависит от термической инерции погружной части термоэлектрического термометра и определяет время и количество погружений в расплав, а также, соответственно, стоимость измерений. Под термической инерцией любого тела понимают его способность изменять свою температуру под действием температуры среды погружения не мгновенно, а по истечении некоторого времени. В течение этого времени внутри тела происходят соответствующие изменения его общей энтальпии и температурного поля. Термическая инерция является свойством всех физических тел, исключая принципиальную возможность безынерционных контактных, в том числе погружных, измерений температуры.

Наиболее строго понятие термической инерции определяется из закономерностей переходного процесса нагрева погруженного сплошного однородного бесконечного цилиндра при теплообмене теплопроводностью. Нагревание тела, вызванное скачкообразным переходом температуры окружающей среды в начальный момент ($\tau_0 = 0$) от одного стационарного значения T_0 к другому T_m , соответствует условиям измерений температуры металлических расплавов термоэлектрическими сменными преобразователями погружения. Для упрощения задачи допустим, что коэффициент теплообмена между телом и средой погружения остается постоянным во времени и поток тепла вдоль оси цилиндра отсутствует, то есть нагрев происходит только по радиусу. При условии, что в начальный момент процесса распределение температуры внутри цилиндра было равномерным $T(r, 0) = T_0$, получим решение, которое определяет температуру на расстоянии r от оси цилиндра для момента времени τ [1]:

$$T(r, \tau) = T_m - (T_m - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n U_n e^{-\nu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}, \quad (1)$$

где R – радиус цилиндра; $A_n = \frac{2hR}{J_0(v_n)(v_n^2 + h^2R^2)}$; $U_n = J_0(v_n \frac{r}{R})$; a – коэффициент температуропроводности тела; α – коэффициент теплообмена; λ – коэффициент теплопроводности тела; $\frac{\alpha}{\lambda}R = hR$ – критерий Био; v_n – корень трансцендентного уравнения $hRJ_0(v_n) = v_nJ_1(v_n)$; $J_0(v_n)$ и $J_1(v_n)$ – функции Бесселя

первого рода нулевого и первого порядков от действительного аргумента.

В принципе, для тел нецилиндрической формы переходный процесс также определяется уравнением (1). Отличие заключается в том, что выражения для коэффициентов A_n и U_n приобретут другой вид и определяющим параметром будет не радиус, а другая величина, другими будут и уравнения, из которых определяется параметр v . Вместо критерия Био можно использовать другой, обобщенный критерий H , позволяющий установить единую для тел любой геометрической формы зависимость корней v_n от H . Значит, уравнение (1) можно рассматривать как общее решение, не зависящее от формы погружаемого тела.

Выражение (1) представляет сходящийся бесконечный ряд. По мере увеличения номера члена ряда быстро возрастает параметр v_n , входящий в показатель степени экспоненциальной функции для каждого члена. Поэтому, с течением времени от начала переходного процесса сходимость ряда быстро возрастает и наступает момент τ_r , когда все члены ряда, кроме первого, становятся исчезающе малыми. Начиная с этого момента, названного по предложению Г. Кондратьева моментом регуляризации, весь дальнейший процесс изменения температуры тела описывается одним членом, экспоненциально возрастающим со временем [2]. Эту стадию переходного процесса называют регулярным тепловым режимом I рода (рис. 1).

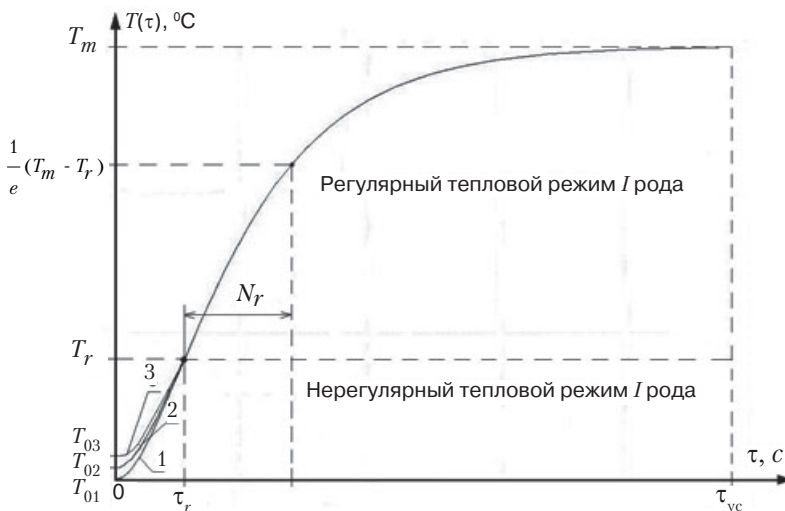


Рис. 1. Изменение температуры сплошного однородного цилиндра, погруженного в среду с температурой $T_m = \text{const}$

Для практики термоэлектрического периодического термоконтроля металлических расплавов исходное равномерное распределение температуры в погружной части термометра наиболее реально. При этом начальная температура может быть различной. Вследствие этого, в дорегулярной стадии ($0 \dots \tau_r$) изменение температуры погружной части может происходить по различным кривым. После момента регуляризации τ_r влияние начальной температуры на характер нагрева погружной части отсутствует.

Если отсчет времени вести от определенного момента, для которого существует регулярный тепловой режим I рода, например, от τ_r , то получим следующее выражение, определяющее температуру любой точки тела:

$$T(r, \tau) = T_m - (T_m - T(r, \tau_r)) e^{-\frac{v_1^2 a}{R^2} (\tau - \tau_r)} = T_m - (T_m - T(r, \tau_r)) e^{-\frac{\tau - \tau_r}{N_T}}. \quad (2)$$

Величина $N_T = \frac{R^2}{v_1^2 a}$ называется показателем термической инерции, который имеет следующий физический смысл. Если $\tau - \tau_r = N_T$, то из формулы (2) следует, что

$$T_m - T(r, \tau) = \frac{1}{e} (T_m - T(r, \tau_r)). \quad (3)$$

Следовательно, показатель термической инерции определяет промежуток времени, необходимый для того, чтобы разность температур между погруженным телом и средой в области регулярного режима стала равной $1/e$ от величины разности температур в момент времени, принятый за начало отсчета. Температуру $T(r, \tau)$ тела в точке можно заменить средней объемной температурой $T(\tau)$. Тогда

$$T_m - T(\tau) = (T_m - T(\tau_r)) e^{-\frac{\tau - \tau_r}{N_T}}. \quad (4)$$

Отсюда получим выражение для показателя термической инерции

$$N_T = \frac{\tau - \tau_r}{\ln(T_m - T(\tau_r)) - \ln(T_m - T(\tau))}. \quad (5)$$

Показатель термической инерции определяет время установления показаний термоэлектрического термометра, при котором наступает термодинамическое равновесие между рабочим контактом термоэлектрического преобразователя и термометрируемой средой. Постоянная времени и время установления показаний также могут использоваться для количественной оценки динамики переходного процесса. Однако, эти количественные характеристики обычно определяются с учетом нерегулярной стадии переходного процесса и зависят от начальных условий.

Как видно из формулы (5), N_T можно определить по любым двум отсчетам температуры в области регулярного теплового режима I рода. Для повышения точности определения показателя термической инерции желательно выполнить ряд отсчетов температуры среды погружения и рабочего контакта термоэлектрического преобразователя и логарифм этих разностей нанести на график как функцию времени погружения. Тогда, если соблюдены условия регулярного теплового режима I рода ($T_m, \alpha = \text{const}$), точки этого графика должны лежать на прямой, угловой коэффициент которой обратно пропорционален N_T [3].

Показатель термической инерции не является неизменной характеристикой погруженного тела. Величина N_T в значительной степени определяется условиями теплообмена между телом и средой. С возрастанием коэффициента теплообмена показатель термической инерции уменьшается и асимптотически приближается к своему минимуму, что соответствует бесконечно большой теплоотдаче от среды к поверхности погруженного тела. Зависимость показателя термической инерции от коэффициента теплообмена описывается характеристической кривой [3]. Характеристические кривые для однородных тел определяются их теплофизическими свой-

ствами, а для сложных, к которым относится погружная часть термоэлектрического термометра – зависят от ее материалов и конструкции. Переходная характеристика для одной и той же погружаемой части термометра также зависит от условий измерений температуры, в том числе глубины погружения. Для принципиальной возможности достижения термодинамического равновесия между металлическим расплавом и рабочим контактом термометра глубина погружения должна быть не меньше критической. Критическая глубина погружения – это наименьшая глубина, при которой возможно термодинамическое равновесие. Условия измерений в каждом конкретном случае, в свою очередь, определяют коэффициент теплообмена и показатель термической инерции. Если условия регулярного теплового режима T рода не соблюдаются, характер изменения температуры рабочего контакта термоэлектрического термометра будет отличаться от описываемого выражением (2).

Показатель термической инерции однозначно связан со временем установления показаний термоэлектрического преобразователя. Время установления показаний представляет собой промежуток времени, по истечении которого термоэлектрический преобразователь при мгновенном переносе его из среды с температурой T_0 в среду с температурой T_m примет температуру последней с абсолютной погрешностью ΔT . Для определения времени установления показаний можно с помощью (4) получить выражение

$$\tau_{yc} = \tau - \tau_r = N_T \ln\left(\frac{T_m - T(\tau_r)}{\Delta T}\right). \quad (6)$$

Переходя к относительной погрешности $\delta T = \frac{\Delta T}{T_m - T(\tau_r)}$, выражение (6) можно переписать в виде

$$\tau_{yc} = \tau - \tau_r = N_T \ln\left(\frac{1}{\delta T}\right). \quad (7)$$

Для расчета полного времени установления показаний термоэлектрического преобразователя необходимо к полученному по формулам (6–7) значению τ_{yc} прибавить длительность регуляризации переходного процесса τ_r . Время установления показаний определяет время измерения (погружения) термоэлектрического преобразователя, в течение которого устанавливается термодинамическое равновесие между расплавом и рабочим контактом с заданной погрешностью. С целью снижения стоимости и повышения экспрессности температурного контроля время погружения должно быть минимально возможным. Время погружения можно сократить как за счет усовершенствования материалов и конструкции погружной части термоэлектрического термометра, так и за счет применения специальных алгоритмов обработки переходной характеристики, позволяющих рассчитать температуру расплава. Алгоритмы обработки могут также использоваться для повышения верхнего предела измерений температуры расплавов.

Погружная часть термоэлектрического термометра, как правило, имеет конструкцию с дополнительным лучистым и конвективным теплообменом. Обычно погрешности таких расчетов комбинированного теплообмена достигают 25 %. Поэтому, для установления закономерностей переходного процесса были экспериментально исследованы переходные характеристики термоэлектрических сменных преобразователей погружения ТСП-Ш в жидком чугуна с температурой $T_m = 1379$ °С (рис. 2). Количественные характеристики переходного процесса зависят от материалов и конструкции ТСП-Ш [4]. При использовании стандартных кварцевых наконечников указанные характеристики определяются конструкцией и материалами рабочего конца термоэлектрического преобразователя и высокотемпературного электро-

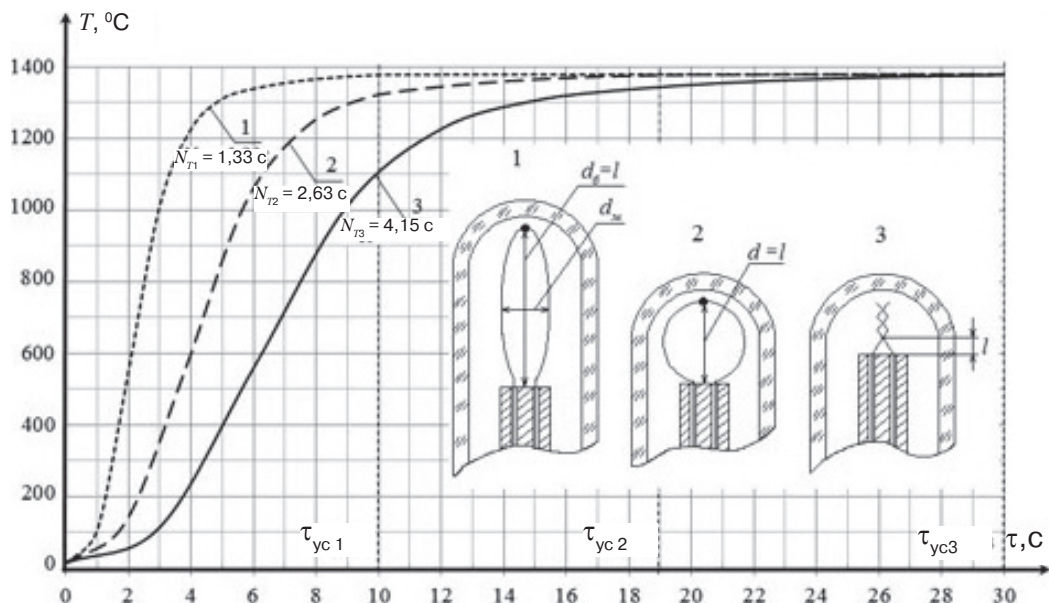


Рис. 2. Зависимости температуры рабочего контакта от времени погружения в расплав при различной форме рабочего конца ТСП-Ш: 1 – овальной; 2 – круглой; 3 – продольной скрутки

изолятора. Наконечник из кварцевого стекла выполнен согласно ГОСТ 19908-90, имеет длину 100, наружный диаметр 9 и толщину стенки 1 мм. Критическая глубина погружения в расплав составляет 70 мм. Внутри наконечника расположен термоэлектрический преобразователь типа ТВР, НСХ ВР-1. Теплопроводность термоэлектродов термоэлектрического преобразователя, изготовленных из сплавов ВР5, ВР20, ниже, чем у термоэлектрических преобразователей платиновой группы, и составляет 68,0 и 100,0 Вт/(м·К) соответственно. Низкая теплопроводность снижает отток тепла по термоэлектродам во внешнюю конструкцию ТСП-Ш. Оптимальный диаметр термоэлектродов составляет 0,2 мм. С уменьшением этого диаметра снижается отвод тепла теплопроводностью по термоэлектродам от рабочего контакта к электроизолятору и показатель термической инерции ТСП-Ш. Однако, при этом усложняется процесс изготовления рабочего контакта. Увеличение диаметра более 0,2 мм повышает отвод тепла теплопроводностью и время погружения, а также усложняет изготовление рабочего контакта. Термоэлектроды размещены в муллитокремнеземистом двухканальном электроизоляторе. На выходе из электроизолятора термоэлектроды образуют рабочий конец с генерирующим термо-ЭДС рабочим контактом, выполненным в виде спая или скрутки. Форма рабочего конца термоэлектрического преобразователя определяет расстояние l от рабочего контакта до торца электроизолятора и теплообмен между ними. Исследовано влияние формы рабочего конца (овальной, круглой и скрутки) на количественные характеристики переходного процесса ТСП-Ш. При этом диаметр электроизолятора выбран минимальным и равным 3 мм. В качестве времени установления показаний принят момент, когда δT составляет 0,1 %, то есть является пренебрежимо малой по сравнению с требуемой точностью измерения температуры расплава (обычно допустимая погрешность не превышает 0,5 %).

В результате анализа установлено, что экспериментальные переходные характеристики являются экспоненциальными и описываются выражением (4). Объясняется это тем, что из 3-х составляющих теплообмена (теплопроводность, конвекция и излучение), последние две действуют встречно. Конвективная составляющая снижает скорость нагрева рабочего контакта термоэлектрического преобразователя за счет охлаждения опускающегося на дно кварцевого наконечника воздуха с более низкой температурой. Проходящее через прозрачную стенку кварцевого наконечника

излучение расплава или шлака ускоряет нагрев рабочего контакта. Поэтому полученный экспоненциальный переходный процесс ТСП-Ш в значительной степени определяется теплопроводной составляющей. Представленные на рис. 2 закономерности показывают, что для рабочего конца овальной, круглой и типа скрутки формы показатель термической инерции соответственно составляет 1,33, 2,63 и 4,15 с, а время установления термодинамического равновесия между рабочим контактом ТСП-Ш и термометрируемым расплавом, при принятом значении $\delta T = 0,1\%$, – 10, 19 и 30 с соответственно. Объясняется это тем, что для исследованных форм рабочего конца удаление генерирующего термо-ЭДС рабочего контакта соответственно составляет 10, 5 и 1 мм. С удалением рабочего контакта уменьшается его теплообмен с имеющим более низкую температуру электроизолятором. При этом лучистый и конвективный теплообмен через и в защитном кварцевом наконечнике для изученных форм рабочего конца остается одинаковым. Снижение теплообмена с электроизолятором приводит к повышению скорости нагрева рабочего контакта и, соответственно, к уменьшению длительности переходного процесса.

Существенное влияние на термическую инерцию ТСП-Ш также оказывает материал и диаметр электроизолятора термоэлектродов. С целью минимизации оттока тепла во внешнюю конструкцию ТСП-Ш электроизолятор выполнен из керамики с низкой теплопроводностью – муллитокремнезема ($\lambda = 1,4$ Вт/(м·К) при 1600 °С) [4]. На рис. 3 представлены установленные экспериментально закономерности влияния диаметра двухканального муллитокремнеземистого электроизолятора на термическую инерцию ТСП-Ш ($T_m = 1460$ °С). Для этих исследований использована оптимальная для температурной динамики овальная форма рабочего конца.

Из рис. 3 видно, что для диаметра электроизолятора 3, 4 и 5 мм показатель термической инерции соответственно составляет 1,30, 1,56 и 1,95 с, а время установления термодинамического равновесия – 10, 12 и 15 с соответственно. Увеличение диаметра электроизолятора повышает его массу, теплоемкость и отвод тепла от рабочего контакта. Усиленный теплоотвод приводит к уменьшению скорости нагрева рабочего контакта и, соответственно, к увеличению времени установления термодинамического равновесия с термометрируемым расплавом.

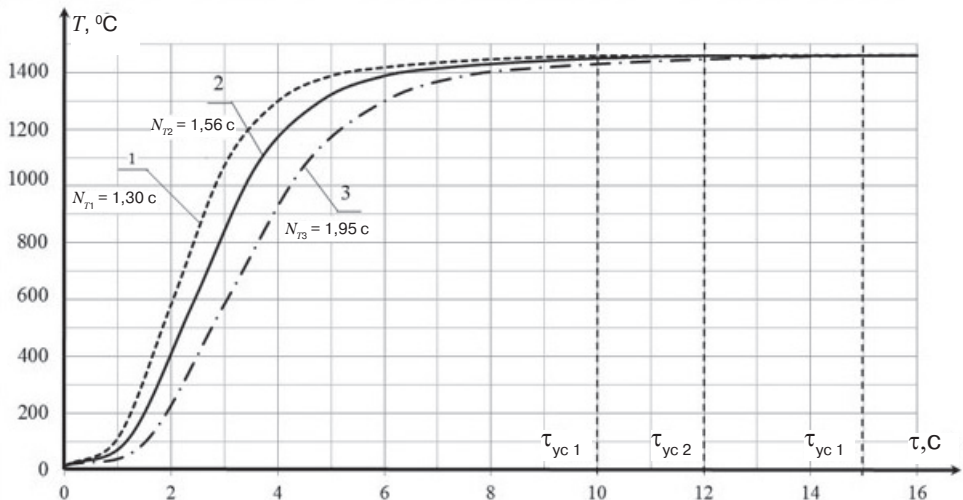


Рис. 3. Зависимости температуры рабочего контакта от времени погружения в расплав при различном диаметре электроизолятора ТСП-Ш: 1 – $d_{эл.и} = 3$ мм; 2 – $d_{эл.и} = 4$ мм; 3 – $d_{эл.и} = 5$ мм

Таким образом, переходный процесс погруженного в расплав термоэлектрического сменного преобразователя с комбинированным теплообменом качественно эквивалентен нагреву теплопроводностью однородного цилиндра в регулярном

тепловом режиме I рода. Поэтому этот переходный процесс можно количественно оценивать показателем термической инерции, постоянной времени и временем установления показаний. Время установления термодинамического равновесия между рабочим контактом термоэлектрического преобразователя и термометрируемым расплавом, кроме условий измерений, определяется материалами и конструкцией погружной части. Оптимальная, с требуемой жесткостью конструкции, овальная форма рабочего конца ТСП-Ш снижает время установления термодинамического равновесия, по сравнению с рабочим концом типа продольной скрутки и круглой формы, в 3,0 и 1,9 раза соответственно. При уменьшении диаметра мулитокремнеземистого электроизолятора термоэлектродов от 5 до 4 и 3 мм время установления термодинамического равновесия дополнительно снижается соответственно в 1,25 и 1,5 раза. В результате исследований доказана возможность конструктивного уменьшения времени погружения ТСП-Ш в расплав, увеличения количества измерений и снижения их стоимости в 4,5 раза.



Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
2. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. – М.: Гостехтеориздат, 1954. – 408 с.
3. Гордов А. Н. Основы пирометрии. – М.: Metallurgia, 1971. – 448 с.
4. Жуков Л. Ф., Петренко Д. А., Гончаров А. Л., Корниенко А. Л. Термоэлектрический сменный преобразователь погружения для периодических измерений температуры металлических расплавов // *Металл и литье Украины*. – 2014. – № 10. – С. 29–34.



References

1. Lykov, A. E. (1967). *Teoriya teploprovodnosti*. [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vyshaya shkola, 600 p. [in Russian].
2. Kondratev, G. M. (1954). *Regulyarniy teplovoy rezhim* [Regular thermal regime]. Moscow: Gostekh-teorizdat, 408 p. [in Russian].
3. Gordov, A. N. (1971). *Osnovy pirometrii* [Basics of pyrometry]. Moscow: Metallurgiya, 448 p. [in Russian].
4. Zhukov, L. F., Petrenko, D. A., Goncharov, A. L., Kornienko, A. L. (2014). *Termoelektricheskiy smenniy preobrazovatel pogruzheniya dlya periodicheskikh izmereniy temperatury metallicheskih rasplavov*. [Thermoelectrical changeable transducer for periodical measurements of metal melts temperature]. *Metall i lite Ukrainy*, no. 10, p. 29–34. [in Russian].

Поступила 04.07.2017