

Методы реализации реперных точек МТШ-90: необходимость совершенствования

Алина Герасимовна Иванова¹, Сергей Федорович Герасимов², Анатолий Иванович Походун³✉, Виктор Маркович Фуксов⁴

^{1, 2, 3, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

²S.F.Gerasimov@vniim.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6188-4909>

³A.I.Pokhodun@vniim.ru✉

⁴V.M.Fuksov@vniim.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы согласованности результатов международных сличений и эквивалентности национальных эталонов, совершенствования методов реализации основных реперных точек затвердевания металлов Международной температурной шкалы МТШ-90. Определены два источника неопределённости значения температуры при реализации реперных точек затвердевания металлов. Проведены эксперименты по иницированию внутренней границы раздела между жидкой и твёрдой фазами металла, исследовано влияние условий иницирования на структуру границы и измеренное значение температуры в ячейках реперных точек алюминия и индия. Рассмотрен вопрос о корректности оценок влияния примесей по закономерностям для единственной наружной границы кристаллизации, движущейся от стенок тигля к его центру. Анализ кривых затвердевания, полученных при разных условиях иницирования, позволил определить критерий сплошной внутренней границы раздела фаз и условия формирования при медленной кристаллизации металла только наружной границы раздела фаз без образования внутренней границы. Полученные критерии позволят метрологическим институтам выбирать корректные условия иницирования внутренней границы раздела фаз при использовании разных конструкций ячеек и нагревателей.

Ключевые слова: Международная температурная шкала, реперная точка, граница раздела твёрдой и жидкой фаз, кристаллизация

Для цитирования: Иванова А. Г., Герасимов С. Ф., Походун А. И., Фуксов В. М. Методы реализации реперных точек МТШ-90: необходимость совершенствования // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 42–47. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-42-47>

The methods of realization of ITS-90 fixed points: the necessity for improvement

Alina G. Ivanova¹, Sergei F. Gerasimov², Anatolii I. Pokhodun³✉, Viktor M. Fuksov⁴

^{1, 2, 3, 4} D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

²S.F.Gerasimov@vniim.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6188-4909>

³A.I.Pokhodun@vniim.ru✉

⁴V.M.Fuksov@vniim.ru

Abstract. The consistency of the results of international comparisons and the equivalence of national standards, improvement of methods for the realization of the International Temperature Scale ITS-90 main fixed points of metals freezing are considered. Two sources of uncertainty of the temperature value during realization of metals freezing fixed points have been determined. Experiments on the initiation of the inner interface between the liquid and solid phases of the metal have been carried out, the effect of the initiation conditions on the interface structure and measured temperature value in aluminum and indium fixed points cells has been investigated. The question of the correctness of the impurities influence estimates according to the laws for the only outer interface moving from the crucible walls to its center is considered. Analysis of the freezing curves obtained under different initiation conditions allowed determining the criterion for the presence of a continuous inner interface and the conditions for the formation of a single outer interface during slow crystallization of the metal without the formation of an inner interface. The obtained criteria will allow metrological institutes to choose the correct conditions for the initiation of the inner interface when using different designs of cells and heaters.

Keywords: International Temperature Scale, fixed point, liquid-solid interface, crystallization

Введение. Два источника неопределённости значения температуры при реализации реперных точек затвердевания металлов практически полностью определяют

результаты международных сличений и эквивалентность национальных эталонов. Оба источника неопределённости обусловлены наличием в ячейке для реализации реперной

точки тонкого цилиндрического слоя металла с развитыми поверхностями теплообмена с нагревателем и платиновым термометром сопротивления (ПТС), а также одновременным формированием двух границ раздела фаз – внутренней и наружной.

Первый источник неопределённости – расхождение между измеренными значениями температуры реперных точек. Расхождение возникает из-за использования различных методов инициирования внутренней границы раздела фаз на поверхности термометрового канала и отсутствия критерия выбора метода формирования сплошной (завершённой) внутренней границы. При незавершённости внутренней границы ПТС показывает осреднённое значение температуры двух границ (внутренней и наружной), что вносит дополнительные искажения в результат измерения. Рекомендованные Консультативным комитетом по термометрии (ККТ) методики реализации основных реперных точек Международной температурной шкалы МТШ-90 требуют инициирования внутренней границы раздела фаз при реализации точек затвердевания металлов [1, 2]. Данная граница считается стабильной, её измеренная температура принимается за температуру реперной точки. Однако накопленный опыт реализации точек затвердевания металлов с инициированием внутренней границы раздела фаз показал, что рекомендованная методика не является универсальной, поскольку результат измерения зависит как от метода инициирования, так и от конструктивных особенностей ячейки, печи и теплового режима. Целью инициирования является получение сплошной внутренней границы, которая может обеспечить постоянство температуры в термометровом канале в течение продолжительного промежутка времени (обычно около 20 % общей продолжительности процесса затвердевания).

Влияние примесей в металле является вторым источником неопределённости температуры реперной точки, вносящим наибольший вклад в бюджет погрешностей. Расчётные методы определения влияния примесей (SIE – Sum of Individual Estimates и OME – Overall Maximum Estimate), рекомендованные в [2], основаны на общих закономерностях обусловленных примесями изменений температуры фазового перехода. Эти методы предполагают независимое влияние каждой примеси на температуру реперной точки, знание зависимости температуры фазового перехода от концентрации каждой из примесей и концентрации всех примесей в металле. Однако необходимые для расчёта справочные значения наклонов кривых ликвидуса в фазовых диаграммах обычно известны для концентраций примесей, значительно превышающих их содержание в применяемых металлах. Исследования [3–5] показали, что не все примеси участвуют в формировании границы раздела фаз и влияют на её температуру. Экспериментальные методы [6–9] позволяют определять суммарный эффект влияния примесей в реальных условиях и не требуют справочных данных, поэтому применение известной закономерности изменения температуры границы раздела фаз от доли жидкой (твёрдой) фазы к анализу экспериментальных кривых процесса медленной направленной кристаллизации с образованием

только наружной границы раздела фаз, движущейся внутрь от стенки тигля, выглядит предпочтительным по сравнению с расчётными методами. Однако условия формирования единственно наружной границы точно не определены.

Эквивалентность национальных эталонов определяется сличением показаний ПТС при реализации точек затвердевания металлов с инициированием внутренней границы раздела фаз, температура которой принимается за температуру реперной точки. Как и в случае оценки единственности наружной границы, критерий образования сплошной внутренней границы отсутствует. В данной работе сделана попытка найти условия медленной кристаллизации металла, при которых формируется либо сплошная внутренняя граница раздела фаз, либо только наружная граница без образования внутренней. Для определения условий образования в ходе инициирования сплошной внутренней границы и определения критерия её завершенности авторы выбрали точку затвердевания алюминия, который характеризуется наибольшей удельной теплотой затвердевания среди всех металлов, применяемых в качестве реперных точек. Для поиска критерия формирования только наружной границы была выбрана точка затвердевания индия, поскольку из-за малого значения удельной теплоты затвердевания и небольшого переохлаждения индия для этой точки велика вероятность появления внутренней границы.

Затвердевание алюминия исследовали в ячейке открытого типа с регулируемым давлением газовой фазы. Исследование процесса затвердевания индия проводили в ячейке из фторопласта-4, конструкция которой позволяет визуально наблюдать внутреннюю границу раздела фаз на разных стадиях затвердевания металла [10, 11]. Кривые затвердевания регистрировали эталонным платиновым термометром сопротивления ПТС-25.

Критерий формирования сплошной внутренней границы раздела фаз. Основным критерием успешного инициирования сплошной внутренней границы раздела фаз должно стать время стабилизации показаний ПТС после введения его в термометровый канал. При формировании сплошной внутренней границы время стабилизации должно быть минимальным из-за максимальной площади теплового контакта между внутренней границей и термометром, отсутствия прямого теплового контакта термометра с внешней границей раздела фаз и постоянства температуры в термометровом канале. В соответствии с теорией тепловой инерции время стабилизации не должно превышать трёх-четырёх значений инерционности ПТС. В среднем инерционность ПТС составляет 2–3 мин. Длительная стабилизация показаний ПТС свидетельствует о незавершённости границы раздела фаз, сформированной на поверхности термометрового канала и, как следствие, о влиянии наружной границы на результат измерения.

Эксперименты с реперной точкой затвердевания алюминия проводили при длительностях затвердевания 6; 10 ч, соответствующих заданиям температуры основного нагревателя на 1,5; 0,7 К меньше температуры затвердевания металла. Внутреннюю границу раздела фаз в ячейке с алюминием

инициировали с помощью керамических стержней комнатной температуры. Были использованы три варианта инициирования: один стержень в течение 1 мин; два стержня последовательно по 1 мин и два стержня по 2 мин каждый.

На рис. 1, а показаны начальные участки кривых затвердевания после инициирования внутренней границы раздела фаз двумя керамическими стержнями комнатной температуры по 1 мин каждый (кривая 1) и одним керамическим стержнем в течение 1 мин (кривая 2). Стабилизация показаний ПТС на кривой 2 происходит через 1 ч после начала измерений, на кривой 1 – через 30 мин. Разность показаний ПТС после стабилизации составляет около 0,5 мК. В обоих случаях полная продолжительность затвердевания составляла 10 ч.

Инициирование границы двумя стержнями по 2 мин каждым позволило получить стабилизацию показаний ПТС на уровне 0,1–0,2 мК в течение 10 мин (рис. 1, б, кривая 1).

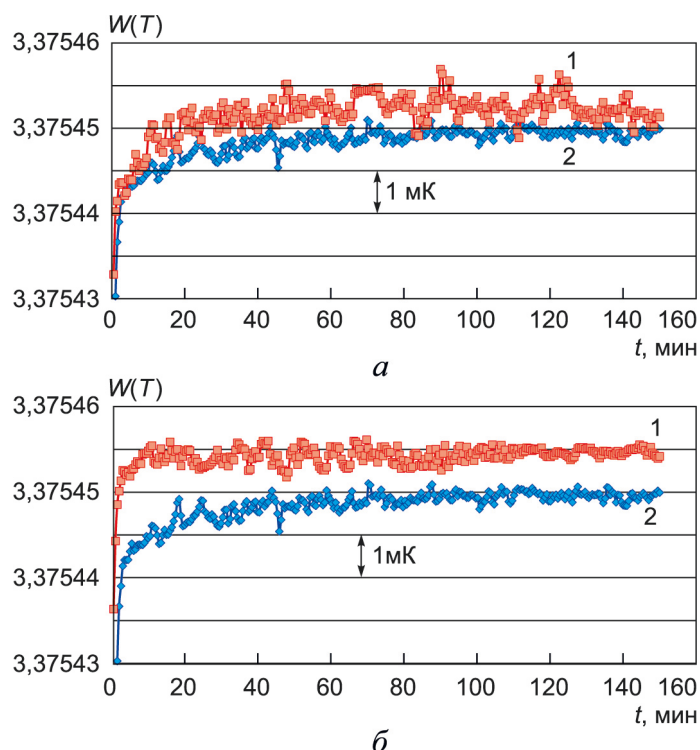


Рис. 1. Начальные участки кривых затвердевания алюминия после инициирования внутренней границы раздела фаз ($W(T)$ – отношение сопротивления термометра при измеряемой температуре к сопротивлению при температуре тройной точки воды):

а – двумя керамическими стержнями комнатной температуры по 1 мин каждый (кривая 1) и одним керамическим стержнем в течение 1 мин (кривая 2); б – двумя керамическими стержнями по 2 мин каждый (кривая 1) и одним керамическим стержнем в течение 1 мин (кривая 2)

Fig. 1. Initial sections of aluminium freezing plateaux after initiation of inner interface with 2 room temperature ceramic rods for 1 minute each (curve 1) and with 1 ceramic rod for 1 minute (curve 2) (a); with 2 room temperature ceramic rods for 2 minute each (curve 1) and with 1 ceramic rod for 1 minute (curve 2) (b); $W(T)$ – the ratio of thermometer resistance at measured temperature to its resistance at triple point of water temperature

В дальнейшем эти значения показаний ПТС сохранялись в течение 10 ч. Разность показаний ПТС при использовании двух стержней по 2 мин и одного стержня 1 мин (см. рис. 1, б, кривая 2) составляет около 1 мК. Такое различие в значениях измеренной температуры внутренней границы следует рассматривать как значительное и при проведении сличений, и при калибровке эталонных термометров.

Большое время стабилизации показаний ПТС и более низкие значения температуры затвердевания (см. рис. 1, а) могут свидетельствовать о незавершённости полученной внутренней границы раздела фаз и, следовательно, о влиянии наружной границы на показания ПТС. Быстрая стабилизация показаний ПТС, наибольшее значение температуры затвердевания и её постоянство (см. рис. 1, б, кривая 1) указывают на формирование при данных условиях инициирования сплошной внутренней границы. В этом случае время стабилизации показаний ПТС удовлетворяет приведённому выше критерию успешного инициирования сплошной внутренней границы раздела фаз.

Подобные результаты по влиянию метода инициирования на результат измерения температуры реперной точки были получены ранее для точек затвердевания индия и цинка [10, 12].

Условия формирования единственной наружной границы раздела фаз при медленной кристаллизации металла. В основе экспериментальных методов определения влияния примесей в металле на температуру фазового перехода лежит проведение медленной направленной кристаллизации расплавленного металла с формированием только наружной границы раздела фаз, движущейся внутрь от стенки тигля. Для металлов с небольшим переохлаждением, таких как In, Zn, Al, медленную кристаллизацию проводят понижением температуры нагревателя от температуры расплавленного металла до значения ниже температуры, необходимой для переохлаждения металла. При исследовании олова, переохлаждение которого может быть более 10 К и требует значительного уменьшения температуры нагревателя, используют метод, предложенный McLaren [13]: перемещение ячейки с расплавленным металлом в верхнюю, более холодную, часть печи для переохлаждения металла и возвращение её в рабочую зону после конца рекалесценции. Однако в большинстве работ, посвящённых влиянию примесей, условия формирования наружной границы не приводятся.

В настоящем исследовании основное внимание направлено на переходный процесс изменения градиента температуры по высоте внутреннего пространства печи при переохлаждении металла и его влияние на образование границы раздела фаз. В настоящее время такие параметры, как температура нагревателя при переохлаждении металла, необходимая продолжительность процесса и внутренний градиент температуры в печи в переходный период не регламентированы и варьируются исследователями в зависимости от конструкции используемых печи и ячейки.

В трёх экспериментах по реализации точки затвердевания индия без инициирования внутренней границы раздела фаз расплавленный металл вначале нагревали на 3 К

выше температуры затвердевания, после чего его переохлаждали при температуре нагревателя на 2; 5; 10 K меньше температуры затвердевания. Кривую затвердевания регистрировали при температуре нагревателя на 0,7 K меньше температуры затвердевания индия. Непосредственно после зарегистрированного переохлаждения металла термометровый канал изымали из ячейки и получали изображение поверхности (рис. 2). Во всех трёх случаях поверхность канала была практически полностью покрыта слоем затвердевшего индия разной плотности.

Площадка затвердевания, приведённая на рис. 3, получена без инициирования внутренней границы раздела фаз, при этом переохлаждение металла проводили при температуре на 10 K меньше температуры затвердевания. Продолжительность площадки около 20 ч. Затвердевание индия в термометровом канале подтверждается быстрым ростом температуры на начальном участке кривой до значений, отличающихся от максимальных, не более чем на 0,3–0,4 мK. Следующий за ним период медленного подъёма температуры, вероятно,

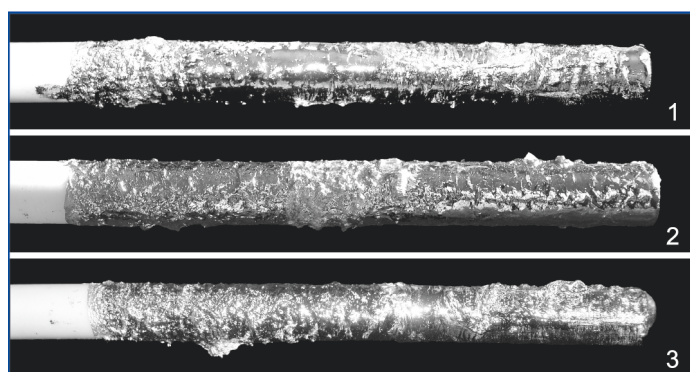


Рис. 2. Вид внутренней границы раздела фаз непосредственно после переохлаждения металла при температуре нагревателя на 2; 5; 10 K (соответственно 1, 2, 3) меньше температуры затвердевания индия

Fig. 2. The shape of the inner interface immediately after supercooling of the metal at heater temperature by 2 (1); 5 (2); 10 (3) K below indium freezing temperature

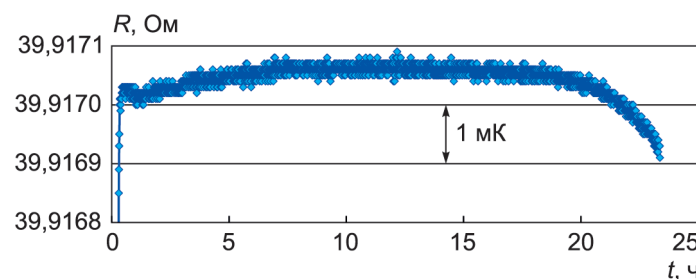


Рис. 3. Кривая затвердевания индия без инициирования внутренней границы раздела фаз при переохлаждении при температуре на 10 K меньше температуры затвердевания

Fig. 3. Indium freezing plateau without inner interface initiation; supercooling is carried out at temperature by 10 K below freezing temperature

соответствует уплотнению внутренней границы раздела фаз в результате дополнительного воздействия растущей наружной границы. Постоянство максимальной температуры в пределах 0,1 мK сохраняется в течение 10 ч при общей продолжительности затвердевания около 20 ч. Эти результаты сложно интерпретировать как измерение температуры только наружной границы раздела фаз, поэтому измеряемая температура затвердевания должна являться результатом суммарного влияния внутренней и наружной границ.

Для уточнения причины появления затвердевшего индия на канале без инициирования внутренней границы раздела фаз проанализирован переходный процесс охлаждения расплавленного металла, перегретого на 3 K больше температуры затвердевания. С этой целью зарегистрированы изменения градиента температуры между полостью печи над ячейкой и термометровым каналом ячейки после уменьшения

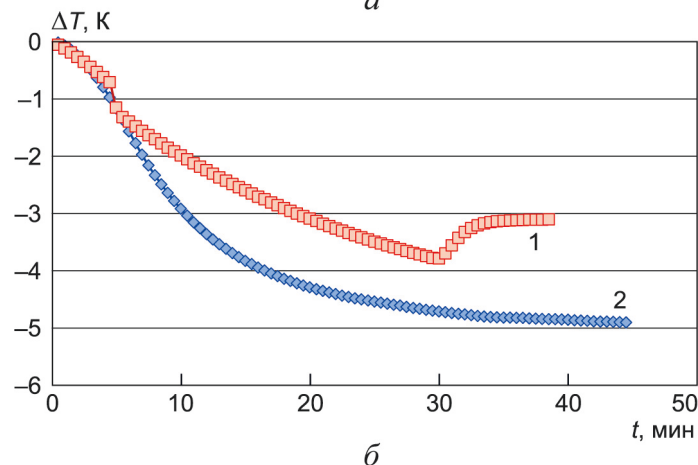
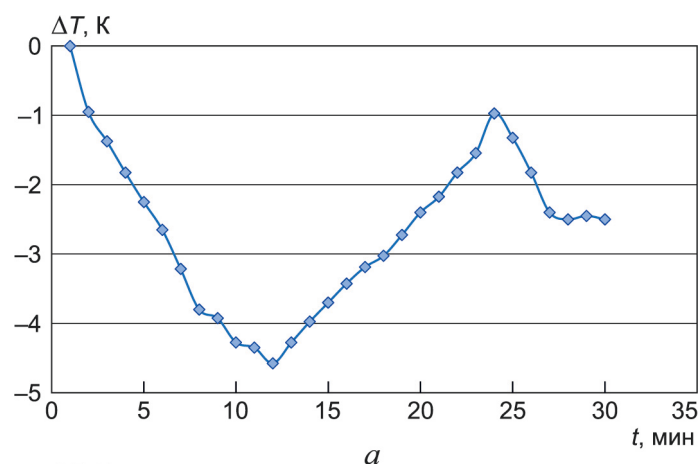


Рис. 4. Изменение разности температур между полостью печи над ячейкой и термометровым каналом (а); изменение температуры на дне термометрового канала (кривая 1) и в верхней части ячейки (кривая 2) (б) после снижения задания температуры нагревателя на 2 K меньше температуры затвердевания индия

Fig. 4. Variations of temperature gradient between the furnace space above the cell and the thermometer well (a); variations of temperature at thermometer well bottom (curve 1) and in upper part of the cell (curve 2) (b) after lowering the heater temperature to a value by 2 K below indium freezing temperature

температуры нагревателя до уровня на 2 К меньше температуры затвердевания индия. Для измерения использовали хромель-алюмелевую (тип К) дифференциальную термопару. Один спай термопары размещали в термометровом канале на уровне половины его высоты, второй спай – в полости нагревателя на 10 см выше ячейки. Начало регистрации соответствует моменту снижения задания температуры нагревателя на 5 К относительно температуры расплавленного индия (рис. 4, а).

Согласно рис. 4, а разность температур между пространством над ячейкой и серединой ячейки изменялась со скоростью 0,5 К в минуту и достигла почти 5 К в течение первых 10 мин после уменьшения температуры нагревателя, т. е. практически соответствовала изменению его температуры. Это обусловлено малой инерционностью воздушного пространства по сравнению с инерционностью ячейки. Дальнейшее уменьшение разности температур происходило из-за охлаждения ячейки до достижения переохлаждения металла. Отсюда следует, что во время переходного процесса часть кварцевой оболочки ПТС, выступающая за пределы термометрового канала, находится при температуре меньше температуры затвердевания. Возникающий при этом отвод теплоты может привести к появлению первых кристаллов на поверхности канала.

Для более точной оценки охлаждения ПТС в процессе переохлаждения индия в термометровый канал ячейки введена пробирка из кварцевого стекла, имитирующая ПТС. Внутри пробирки расположены два платиновых чувствительных элемента (каждый длиной 3,5 см и диаметром 3 мм): один элемент установлен на дне пробирки, второй – на уровне крышки ячейки. В исходном состоянии расплавленный металл был перегрет на 3 К больше температуры затвердевания. Изменения температуры элементов показаны на рис. 4, б, начало измерения температуры чувствительных элементов соответствует моменту уменьшения задания температуры нагревателя на 5 К.

Из рис. 4, б следует, что температура элемента, установленного на уровне крышки ячейки (кривая 2), уменьшается быстрее, чем температура элемента на дне канала. Через 15 мин температура верхнего элемента становится меньше температуры переохлаждения металла на 1 К и далее сохраняется до момента переохлаждения и начала затвердевания индия. Это и является причиной возникновения дополнительного отвода теплоты от термометрового канала, приводящего к появлению внутренней границы раздела фаз.

Заключение. Предложенный в работе критерий формирования сплошной внутренней границы раздела фаз в процессе её инициирования позволит определить оптимальные условия затвердевания металла, обеспечивающие постоянство температуры в термометровом канале в течение продолжительного промежутка времени. Результаты работы позволяют сделать вывод, что экспериментальные кривые медленного затвердевания металла в ячейках реперных точек, полученные без инициирования внутренней границы раздела фаз, нельзя однозначно рассматривать как изменения температуры только наружной границы и использовать для определения влияния примесей. В этом случае появление внутренней границы раздела фаз обусловлено неконтролируемым градиентом температуры

по высоте пространства над ячейкой в период переохлаждения металла и, как следствие, нежелательным охлаждением ПТС в термометровом канале.

Использование полученных результатов позволит метрологическим институтам выбрать корректный метод реализации реперных точек затвердевания металлов при использовании разных конструкций ячеек и нагревателей.

Список литературы

1. Mangum B. W., Blombergen P., Chattle M., Felmuth B., Marcarino P., Pokhodun A. I., *Metrologia*, 1999, vol. 36, pp. 79–88. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/2/2>
2. Felmuth B., Hill K. D., Pearce J. V., Peruzzi A., Steur P. P. M., Zhang J., *Guide to the realization of the ITS-90. Fixed points: influence of impurities*. Paris: BIPM, Consultative Committee for Thermometry, 2018, available at: https://www.bipm.org/utils/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_2018.pdf (accessed: 07.06.2021).
3. Rudtsch S., Aulich A., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, 32. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2153-y>
4. Rudtsch S., Fahr M., Fischer J., Gusarova T., Kipphardt H., Matschat R., *International Journal of Thermophysics*, 2008, vol. 29, pp. 139–150. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0358-9>
5. Fahr M., Rudtsch S., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. 423–438. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/5/006>
6. Malik Z., Hunt J. D., Davies H., Lee P. D., Lowe D., Ques- ted P. N., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32, pp. 1589–1601. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0925-y>
7. Pearce J. V., Sun J. P., Zhang J. T., Deng X. L., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, no. 4. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2139-9>
8. Widiatmo J. V., Harada K., Yamazawa K., Arai M., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 561–572. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/6/012>
9. Widiatmo J. V., Sakai M., Satou K., Yamazawa K., Tamba J., Arai M., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32, pp. 309–325. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0871-0>
10. Ivanova A. G., Abasov M. Yu., Gerasimov S. F., Pokhodun A. I., *AIP Conference Proceedings*, 2013, vol. 1552, pp. 243–248. <https://doi.org/10.1063/1.4819547>
11. Ivanova A. G., Fuksov V. M., Gerasimov S. F., Pokhodun A. I., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, no. 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2168-4>
12. Иванова А. Г., Ильин А. Ю., Анализ условий образования внутреннего фронта раздела фаз и их влияние на температуру затвердевания цинка // Измерительная техника. 2004. № 11. С. 43–46.
13. McLaren E. H., Murdock E. G., *Canadian Journal of Physics*, 1960, vol. 38, no. 1, pp. 100–118. <https://doi.org/10.1139/p60-010>

References

1. Mangum B. W., Blombergen P., Chattle M., Felmuth B., Marcarino P., Pokhodun A. I., *Metrologia*, 1999, vol. 36, pp. 79–88. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/2/2>

2. Fellmuth B., Hill K. D., Pearce J. V., Peruzzi A., Steur P. P. M., Zhang J., *Guide to the realization of the ITS-90. Fixed points: influence of impurities. Paris: BIPM, Consultative Committee for Thermometry*, 2018, available at: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_2018.pdf (accessed: 07.06.2021).
3. Rudtsch S., Aulich A., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, 32. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2153-y>
4. Rudtsch S., Fahr M., Fischer J., Gusarova T., Kipphardt H., Matschat R., *International Journal of Thermophysics*, 2008, vol. 29, pp. 139–150. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0358-9>
5. Fahr M., Rudtsch S., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. 423–438. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/5/006>
6. Malik Z., Hunt J. D., Davies H., Lee P. D., Lowe D., Ques-
ted P. N., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32,
pp. 1589–1601. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0925-y>
7. Pearce J. V., Sun J. P., Zhang J. T., Deng X. L., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, no. 4.
<https://doi.org/10.1007/s10765-016-2139-9>
8. Widiatmo J. V., Harada K., Yamazawa K., Arai M., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 561–572.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/6/012>
9. Widiatmo J. V., Sakai M., Satou K., Yamazawa K., Tamba J.,
Arai M., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32,
pp. 309–325. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0871-0>
10. Ivanova A. G., Abasov M. Yu., Gerasimov S. F., Pokho-
dun A. I., *AIP Conference Proceedings*, 2013, vol. 1552, pp. 243–
248. <https://doi.org/10.1063/1.4819547>
11. Ivanova A. G., Fuksov V. M., Gerasimov S. F., Pokho-
dun A. I., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38,
no. 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2168-4>
12. Ivanova A. G., Il'in A. Yu., *Measurement Techniques*, 2004,
vol. 47, pp. 1096–1099.
<https://doi.org/10.1007/s11018-004-0013-9>
13. McLaren E. H., Murdock E. G., *Canadian Journal of Physics*,
1960, vol. 38, no. 1, pp. 100–118.
<https://doi.org/10.1139/p60-010>

Статья поступила в редакцию 22.03.2021; принята к публикации 07.06.2021.