

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.И.МЕЧНИКОВА

На правах рукописи

МЕЙСА С.А.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

01. 04. 14 - Теплофизика и Молекулярная Физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Одесса - 1994

Работа выполнена на кафедре термодинамики
Одесского государственного университета им. И.И.Мечникова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент ЕРШОВ В.А.

Официальные оппоненты доктор технических наук,
зав. отделом ИИПТ АН Украины
КРИВИЦКИЙ Е.В.
Доктор физико-математических наук,
доцент кафедры общей химии ОГУ
ФЛОРКО А.В.

Ведущая организация: Одесская государственная академия холода
(ОГАХ)

Защита состоится "27" 01 1995 г. в "14" часов на
заседании Специализированного совета, шифр Д. 068. 24. 03 по физико-
математическим наукам (Физика) Одесском государственном университете
им. И.И. Мечникова по адресу: 270100, г. Одесса, ул. Щегкина, 14,
Большая физическая аудитория

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Одесского
государственного университета.

Автореферат разослан "27" 12 1994 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
к. ф.-м. наук, доцент

Смау

МАРГАЩУК С.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756185 (W)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Прогресс современных отраслей науки и техники, вызывающий повышенный интерес к теплофизическим свойствам веществ и материалов, приводит к необходимости разработки расчетно-теоретических методов исследования свойств рабочих сред в широкой области изменения параметров состояния. Применение новых источников энергии в современных технологиях, синтез новых материалов, прогнозирование физических явлений в нетрадиционных приложениях экспериментальной и теоретической физике значительно расширили диапазон параметров состояния, для которых важна информация о теплофизическом поведении рабочих веществ. Эксперимент, как наиболее надежный путь получения данных о теплофизических свойствах веществ, в современных условиях измерений сопряжен со значительными принципиальными трудностями, связанными со все более жесткими требованиями, предъявляемыми к измерительным системам по уменьшению абсолютной погрешности измерений. В особенности это относится к измерению температуры, являющейся одним из важнейших параметров многих технологических процессов современного производства, точность измерения которой в значительной мере влияет на технико-экономические показатели выпускаемой продукции.

Известно, что термоэлектрические преобразователи (термопары) являются наиболее отработанными приборами для измерения температуры контактными методами и обеспечивают минимальные инструментальные и наблюдаемые погрешности измерений. Что же касается вопроса снижения методической погрешности, то ответ на него весьма затруднителен. Это в первую очередь связано с тем, что измерительный преобразователь температуры (ИПТ) является инородным телом, возмущающим ранее существовавшее поле температур изучаемого объекта. Учесть это возмущение в общем случае можно после изучения всего комплекса явлений теплообмена, происходящих до и после монтажа ИПТ на объекте и в непосредственной близости от элементов термопреобразователя. Поэтому исследование условий и критериев, обеспечивающих достижение минимальных методических погрешностей измерения температуры, является важной актуальной задачей в теплофизических исследованиях.

Целью работы является разработка метода расчета и анализа методической погрешности измерения температур контактным методом, исследование геометрических и критериальных условий, налагаемых на

термоэлектрические преобразователи для достижения минимальности методической погрешности измерений температуры, а также создание методики определения коэффициента теплопроводности и излучательных характеристик микро неоднородных включений (спая термоэлектрического преобразователя). Отработка методики расчета и анализа методической погрешности измерения температуры при исследовании влияния процессов тепло-массопереноса на кинетику фазовых переходов первого рода на одиночных каплях многокомпонентных растворов.

Научная новизна работы

1. Предложен новый подход к оценке методической погрешности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями, основанный на анализе локальных температурных и концентрационных полей и контакта: среда - термопреобразователь и сформулированы геометрические и критерийные условия, налагаемые на термопреобразователи, выполнение которых обеспечивает минимум методической погрешности.

2. Впервые на основе принципа обобщенной проводимости получены аналитические формулы для определения эффективных коэффициентов теплопроводности дисперсных сред с каплями водных растворов гигроскопических веществ.

3. Решена проблема расчета и прогнозирования теплофизических характеристик микро неоднородных сред с дисперсными включениями.

4. Впервые разработанная методика анализа и достижения минимума погрешностей температурных измерений внедрена в практику теплофизических измерений для определения влияния процессов тепло-массопереноса на кинетику фазовых переходов первого рода на одиночных каплях многокомпонентных растворов.

Практическая ценность результатов работы заключается в выработке рекомендаций по монтажу измерительных преобразователей температур на объектах для исследования температурных полей и решения ряда научно-технических задач, для которых необходимо знание параметров состояния рабочей среды с высокой степенью точности. Теоретически обоснованные и проверенные на эксперименте условия, налагаемые на термоэлектрические преобразователи для достижения минимальности методической погрешности измерений температуры могут найти неограниченное применение в ряде отраслей энергетики, ядерной техники, металлургии, плазмотехники, метеорологии, микроэлектроники, для решения ряда проблем защиты окружающей среды.

Помимо этого, возможность использования разработанной методики

определения теплофизических свойств микронеоднородных сред с включениями имеет непосредственное значение для экспериментальной и теоретической теплофизики.

Автор защищает следующие основные положения работы:

1. Метод расчета и анализа методической погрешности измерения температур контактным методом.
2. Постановку и решение задачи исследования геометрических и критериальных условий, налагаемых на термоэлектрические преобразователи для достижения минимума методической погрешности измерений температуры.
3. Методику определения коэффициентов теплопроводности и излучательных характеристик микронеоднородностей спая термоэлектрического преобразователя.
4. Аналитические зависимости для расчета эффективных коэффициентов теплопроводности водных растворов гигроскопических веществ, используемых для расчета методической погрешности измерения температуры одиночных капель многокомпонентных растворов.
5. Учет влияния инородного покрытия спая термопреобразователей на точность измерения температуры. Формулы и зависимости для определения коэффициентов теплопроводности и излучательной способности инородных веществ, подвешенных на спай термопары.
6. Экспериментальные теплофизические измерения параметров конденсационного роста и испарения капель многокомпонентных растворов гигроскопических веществ в парогазовой смеси атмосферного воздуха и паров воды с учетом предложенной в работе методики расчета и анализа методической погрешности измерения температур, позволяющей существенно уточнить данные по эффективности водных и неводных растворов гигроскопических веществ.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались на 9 Международном Симпозиуме "Surfactants in solution" (Варна, Болгария, 1992), Шестой Международной Конференции "Organic and Molecular Films" (Квебек, Канада, 1993), на научных семинарах кафедры теплофизики Одесского государственного университета.

Публикации Основные результаты диссертации изложены в шести печатных работах.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов. Содержит 132 страницы текста, включающих 15

рисунок в таблиц и 109 наименований цитированных источников литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований и практическая ценность результатов работы. Формулируются основные цели и задачи работы особое внимание уделено главным моментам проблемы оптимизации температурных измерений контактным методом.

В первом разделе диссертационной работы рассмотрено современное состояние вопроса анализа и методов уменьшения абсолютных погрешностей измерения температуры. Даны обзор и критический анализ известных методик исследования погрешностей измерения температур контактным методом. Показано, что современные исследования и расчеты дают только порядок погрешности температурных измерений т.к. не учитывают искажений температурного поля, вносимых ИПТ, а также вследствие отличия теплофизических характеристик ИПТ от характеристик среды.

Обсуждена необходимость исследования условий, налагаемых на термовольтовые преобразователи (термопары), при которых достигаются минимальные методические погрешности измерения температуры. При этом отмечается, что возникающая нетривиальная зависимость вычислительных формул для анализа методической погрешности измерений температуры от теплофизических свойств материалов, приводит к необходимости знания коэффициента теплопроводности (или коэффициента излучательной способности) в области высоких температур спаев термовольтовых преобразователей. Однако определение коэффициента теплопроводности спаев термопреобразователей до сих пор остается открытым вопросом, поэтому в работе ставится задача определения геометрических и критерильных условий, налагаемых на термовольтовые преобразователи для достижения минимума методической погрешности в измерении температуры.

В качестве метода исследования предлагается использовать действенный в вычислительном отношении принцип обобщенной проводимости. Записаны основные соотношения для определения теплофизических характеристик микрогетерогенных сред с включениями.

Приведены доводы в пользу апробации полученных методических разработок и расчетных схем в экспериментальных теплофизических измерениях параметров конденсационного роста и испарения капель

многокомпонентных растворов гигроскопических веществ в парогазовой смеси и определения влияния процессов теплопереноса на кинетику фазовых переходов первого рода на одиночных каплях многокомпонентных растворов. Обосновано, используемое в методике измерений теплофизических характеристик одиночных капель многокомпонентных растворов в аэродисперсных системах методом "подвеса на термопару", приближение квазистационарности.

Сформулированы основные этапы достижения конечной цели диссертационной работы: определение теплофизических свойств микронеоднородных веществ и материалов; исследование параметров термозлектрических преобразователей, обеспечивающих достижение минимальной методической погрешности измерений температуры; оптимизация температурных измерений с учетом радиационного теплообмена; проведение модельных экспериментов по изучению фазовых переходов первого рода на одиночных каплях многокомпонентных растворов

Второй раздел работы посвящен вопросу разработки методики и расчетных схем определения коэффициента теплопроводности микронеоднородных сред, для решения которого был привлечен принцип обобщенной проводимости, базирующийся на аналогии между дифференциальными уравнениями стационарного потока теплоты и тока проводимости.

Основная идея предлагаемой методики определения коэффициента теплопроводности микронеоднородных веществ спая термозлементов термопары λ_z заключается в следующем: Из решения уравнения теплопроводности для расчета полей температур $\lambda_{эф}$ системы "среда + термопара" и коэффициентом теплопроводности спая термозлементов термопары λ_z ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ - коэффициенты теплопроводности спая термозлементов, окружающей среды и термопреобразователей, соответственно,

$$\lambda_z = \frac{2 \lambda_2 (\lambda_{эф} - \lambda_3 - \lambda_4)}{\lambda_3 + \lambda_4 - \lambda_{эф} + \lambda_2 \left(1 - \frac{\lambda_3 + \lambda_4}{2 \lambda_2} \right)} \quad (1)$$

где эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ системы "среда + термопара" определяется по результатам независимых тепловых измерений потоков тепла через термозлементы.

Используя принцип обобщенной проводимости, проведены исследования по определению коэффициента теплопроводности инородных веществ, подвешенных на термопару. Методика определения коэффициента теплопроводности инородного включения λ_z подразумевает определение

эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$ системы "среда + инородное покрытие + термопары" по данным результатов измерений тепловых потоков по термопреобразователям с установлением зависимости $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$ - коэффициенты теплопроводности спаев термопреобразователей, инородного тела, окружающей среды и термопреобразователей. Соответственно; a, b - радиусы спаев и инородного покрытия):

$$\lambda_{эф}^0 = 2 \frac{\lambda_4 (\lambda_4 + \lambda_5)}{\lambda_2} (1 - \alpha)^{-1} \left[1 + \frac{3\lambda_1 (\lambda_2 - \lambda_4 - \lambda_5)}{(\lambda_4 + 2\lambda_5)(\lambda_1 + 2\lambda_2)} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_4 + 2\lambda_2} \frac{a(a+b)}{b^2} \left(1 + 4 \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_2 + 2\lambda_3} \frac{a^2}{b(b+a)} \right) \right] \quad (2)$$

студ. определение коэффициента теплопроводности инородного тела λ_2 вызывает трудностей.

В третьем разделе с использованием принципа обобщенной проводимости, проводятся исследования, позволяющие уменьшить методическую погрешность при измерении температур термопары. Получены явные выражения для радиуса спаев термопреобразователей, угла между выпяжениями для радиуса спаев термопреобразователей, угла между выпяжениями для радиуса спаев термопреобразователей, отношения между коэффициентами теплопроводности среды, в которых проводятся измерения, спаев термопреобразователей и самих термопреобразователей, которые обеспечивают минимум методической погрешности измерения температуры. Указано на необходимость постоянного изменения радиуса спаев термопреобразователей при внедрении в измеряемую среду. Сделано влияние инородных покрытий спаев термопары на ее геометрические и теплофизические характеристики, оптимальные в плане методической погрешности.

Использование ИТ, погружаемого в изучаемый объем рабочей среды, искажает установившееся поле температур и приводит к новому их распределению в месте измерения. Установившиеся поля температур и ее градиента вблизи ИТ меняются, а его собственные элементы приобретают температуру, близкую к имевшейся в среде. Проблема определения методической погрешности измерения является в теплофизическом аспекте фактически задачей расчета локальной температуры в функциональном элементе измерителя (спаев термопары).

Локальное отклонение температуры в физически малых объемах (внутри дисперсных включений, элементе ИТ) от ее среднего значения в плоскости, нормальной градиенту температуры среды,

определяются соотношением теплофизических параметров включений (например, их теплопроводности) и соответствующих параметров среды в целом (λ_{eff} и др.), а также особенностями поля градиента температуры вблизи включения. Из условий непрерывности температуры и потока тепла выводятся граничные условия для уравнений Гельмгольца, что в конечном итоге дает функциональную связь параметров неоднородности и соответствующего эффективного теплофизического параметра изучаемой среды в целом. При этом физически значимым для термоэ.д.с. термопары будет температура ее спая $T^{(4)}$, которая, как ясно из предыдущего, отлична от температуры среды в месте измерения. Ее отклонение $T^{(4)} - T^{(2)}$ и будет неустранимой методической погрешностью измерителя температур с помощью термопреобразователя.

Для модели термопары с термически тонкими элементами (рис 1а)

$$\begin{aligned}
 T^{(1)} &= T_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} (z + z_0) + \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} z \\
 T^{(2)} &= T_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} (z + z_0) + \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} \frac{R^3}{z^2} \cos \theta \\
 T^{(3)} &= T_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} (z + z_0) + \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} \frac{R^3}{z^2} + \\
 &+ \left(1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 + 2\lambda_2} \frac{3\lambda_1}{\lambda_3} \frac{z - R}{R^3} z^2 \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 T^{(4)} &= T_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} (z + z_0) \cos \theta_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} \frac{R^3}{z^2} \cos^3 \theta_1 \\
 &\times \left(1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_4}{\lambda_1 + 2\lambda_2} \frac{3\lambda_1}{\lambda_4} \frac{(z - R)z^2}{R^3 \cos \theta} \right)
 \end{aligned}$$

Абсолютная методическая погрешность определена как

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{3\lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} z \left[\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{3\lambda_1} \frac{R^3}{z^3} (1 + \cos^3 \theta_1) - \right. \\
 &\left. - \left(1 - \frac{R}{z} \right) \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2 - \lambda_4}{\lambda_4} \cos \theta_1 \right) + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{3\lambda_1} \right]
 \end{aligned} \quad (4)$$

Исследования условий, налагаемых на параметры термопары, при которых достигается минимальность методической погрешности, проведены, исходя из следующих экспериментально реализуемых ситуаций: 1) $z = 1$ - этот случай реализуется тогда, когда необходимо определить температуру одной из стенок (рис. 1а)

$$T = \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} z (2 + \cos^2 \theta_1) \quad (5)$$

и δT принимает минимальное значение, когда $\theta_1 = \frac{\pi}{2} k (k=1, 3, 5, \dots)$
 $2R/z \ll 1$ - этот случай соответствует измерению температуры в
 среде вдали от стенки:

$$\delta T = \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{3\lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_2} z \left[\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} - \left(1 - \frac{R}{z}\right) \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \cos \theta_1\right) \right] \quad (6)$$

При неизменном радиусе спая условию $\delta T = 0$ соответствует угол
 между термопреобразователями (рис. 1а)

$$\theta_1 = \arccos \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{3\lambda_1} \left(1 + \frac{R}{z} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

и выполнение условия:

$$\lambda_2 \left(\frac{\lambda_2 + \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} + \frac{1 + R/z}{3\lambda_1} \right) \geq \frac{7}{3} + \frac{R}{3z} \quad (8)$$

Расчеты показывают, что если измерения проводить в воздухе,
 газах и жидкостях, то условие (8) не выполняется. Минимизация
 же δT соответствует углу $\theta_1 = \pi n$, $n=0, 1, 2, \dots$; ($\lambda_1 = \lambda_2$), откуда сле-
 дует, что при измерении температуры в указанных средах вдали от
 стенки необходимо термопреобразователи располагать параллельно друг
 другу. Однако, если проводятся измерения в жидких металлах, то
 условие (8) вполне выполнимо.

Условие $\delta T = 0$ позволяет установить только лишь связь между ге-
 метрическими характеристиками термопары θ_1 и R/z , но не их зави-
 симости от теплофизических характеристик системы "среда + термопа-
 ра" в целом. Определение функциональных зависимостей R/z и θ_1 от
 λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 требует проведения минимизации $\delta T(4)$ по $\cos \theta_1$ и
 R/z . Первое позволяет определить угол θ_1 между термопреобразова-
 телями, а второе - определить значение R/z , до которого необходимо
 поддерживать угол между термопреобразователями равным θ_1 . Эти усло-
 вия найдены в виде следующих выражений:

$$\cos \theta_1 = \mp \frac{z}{R} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_4} \frac{\lambda_4 - \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{z}{R} \left(1 - \frac{R}{z} \right) \right]^{1/2}$$

$$R = z \left[\frac{\left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2 - \lambda_4}{\lambda_4} \cos \theta_1 \right) \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 + \cos^2 \theta_1)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\frac{R^4}{z^4} \cos^2 \theta_1 \left\{ 1 + \cos^2 \theta_1 \left[1 - \frac{9}{4} \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_4} \right)^2 \right] + \frac{3\lambda_1}{2\lambda_4} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_4 - \lambda_2} \frac{z^2}{R^2} \right\} \frac{\lambda_1^2}{\lambda_4^2} > 0$$

$\cos \theta_1 > 0$, если $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4$; $\cos \theta_1 < 0$, если $\lambda_4 < \lambda_2 < \lambda_1$

$\cos \theta_1 = 0$, если $\lambda_2 = \lambda_4 < \lambda_1$; $\cos \theta_1 \geq 1$, если $\lambda_2 < \lambda_4$ ($\theta_1 < \pi/2$); $\lambda_2 > \lambda_4$ ($\theta_1 > \pi/2$)

Из (9) вытекают рекомендации, соблюдение которых оптимизирует температурные измерения в плане минимума методической погрешности:

-если проводить измерения в среде, где коэффициент теплопроводности λ_2 будет больше (меньше) коэффициента теплопроводности спая термозлементов λ_1 и меньше (больше) одного из коэффициентов термопреобразователей λ_4 (λ_3), то необходимо располагать термопреобразователи под острым (тупым) углом;

-если проводить измерения в среде, где коэффициент теплопроводности λ_2 будет меньше коэффициента теплопроводности спая термозлементов λ_1 и равен одному из коэффициентов термопреобразователей λ_4 (λ_3), то необходимо располагать термопреобразователи под прямым углом.

В табл. 1 приведены значения геометрических характеристик для различных видов термопар, при которых достигается минимальность методической погрешности. При этом минимальная методическая погрешность измерения температур термопары при условиях $\lambda_2 > \lambda_1$, λ_3 , λ_4 ; $\theta_1 < \pi/2$ ($2n + 1$) будет равна:

$$\delta T_{min} = \frac{T_2 - T_1}{d} z \frac{\lambda_1^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{3/2}}{\lambda_3 (\lambda_1 + 2\lambda_2) (\lambda_2 - \lambda_1)^{1/2}} \left\{ 1 + \frac{\lambda_3^{3/2} (\lambda_3 - \lambda_4)^{3/2}}{\lambda_1^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{3/2}} - \frac{3\lambda_3^{1/2} (\lambda_2 - \lambda_1)^{1/2}}{\lambda_1^{1/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{1/2}} \left[1 + \frac{\lambda_3 (\lambda_3 - \lambda_4)}{\lambda_4 (\lambda_2 - \lambda_3)} - \frac{\lambda_1^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{1/2}}{\lambda_3^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_1)^{1/2}} \right] \right\} \quad (10)$$

а при $\lambda_2 < \lambda_1, \lambda_3, \lambda_4$; $\theta > \pi/2$ (2n+1):

$$\delta T_{min} = \frac{T_2 - T_1}{d} Z \frac{\lambda_1^{3/2} (\lambda_3 - \lambda_2)^{3/2}}{\lambda_3 (\lambda_1 + 2\lambda_2) (\lambda_2 - \lambda_1)^{1/2}} \left\{ 1 + \frac{\lambda_3^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_4)^{3/2}}{\lambda_4^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{3/2}} - \frac{3\lambda_1^{1/2} (\lambda_2 - \lambda_1)^{1/2}}{\lambda_1^{1/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{1/2}} \left[1 + \frac{\lambda_1 (\lambda_2 - \lambda_4)}{\lambda_4 (\lambda_2 - \lambda_3)} - \frac{\lambda_1^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_3)^{1/2}}{\lambda_3^{3/2} (\lambda_2 - \lambda_1)^{1/2}} \right] \right\} \quad (11)$$

Таблица 1. Значения угла между термопреобразователям для различных видов термопар (средами, в которых проводятся измерения, являются газы и жидкости) θ , град.

N	Тип термопары	воздух	глицерин	20% этиловый спирт	50% соляная К-та
1	медь-константан	178	-	-	-
2	хромель-алюмель	179	-	-	-
3	вольфрам-молибден	180	184	141	-
4	вольфрам-тантал	180	184	141	-
5	хромель-копелеь	180	-	-	-
6	алюмель-тантал	180	177	178	18
7	копелеь-молибден	180	174	178	18
8	молибден-тантал	180	177	-	18
9	алюмель-молибден	180	175	177	18
10	алюмель-копелеь	180	175	177	18

Анализ полученных зависимостей учета минимальной методической погрешности измерения температуры для различных сред показал, что если измерения проводятся в воздухе, то медь-константановая термопара позволяет обеспечить минимальность методической погрешности; в случае же измерений в жидких металлах ситуация видоизменяется, здесь минимальность методической погрешности позволяет осуществить хромель-копелевая термопара.

Во многих технологических процессах при проведении измерений температуры термопарой существенным вопросом является влияние инородного покрытия (окисная пленка, сажа и т.п.) спая термопреобразователей термопары на точность измерения температуры (рис.16). В настоящей работе на основе развиваемого подхода получено общее выражение для погрешности измерения термопары с покрытием. Проведен анализ экспериментально реализуемых ситуаций, выработаны рекоменда-

ции по выбору и расположению термопреобразователей с учетом влияния инородного покрытия. Например, для случая измерения температуры, когда $a/z < 1$ при измерениях в газовой среде минимум от достигается при условии параллельного расположения термопреобразователей.

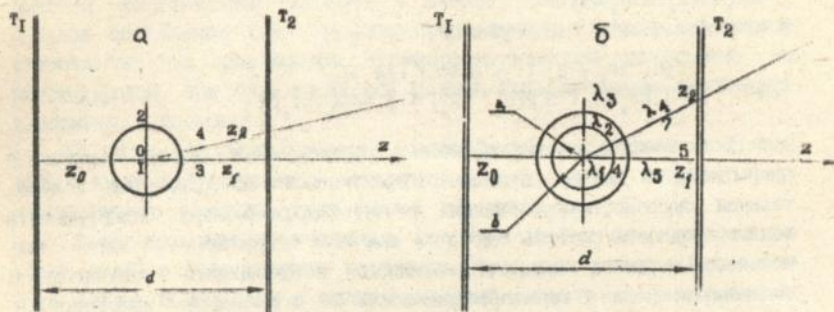


Рис.1. Схемы расчета (геометрия эксперимента) эффективного коэффициента теплопроводности систем "среда + термопара" (а), "среда + термопара + инородное вещество на термопаре" (б). T_1 и T_2 — температуры стенок; a и b — радиусы спая термопреобразователя и покрытия; d — расстояние между стенками; z_0 , z_1 — расстояние от стенок до начала координат.

В четвертом разделе работы рассматривается задача нахождения теплофизических и геометрических параметров термопары, обеспечивающих минимальную методическую погрешность измерения температуры в случае, когда существенным является процесс излучения (измерение высоких температур). Формула для потока тепла в случае высокой температуры, приведенная в разделе 3, чрезвычайно усложняется вследствие нелинейности условий на границе раздела сред при сшивке решений. Однако эту трудность для металлических сред удалось обойти с использованием закона Видемана-Франца в приближении Друде и Хагена-Рубенса. Это дало возможность сформулировать задачу в "терминах излучательных способностей" и получить эффективный коэффициент теплопроводности в виде функции излучательных способностей элементов ИТП среды. Так, для эффективного коэффициента излучательной способности микроненормодных материалов, где микровключениями яв-

лются шарики с излучательной способностью ϵ_1 , получено в приближении Друде:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_2 \left(\frac{\epsilon_2^2 + 2\epsilon_1^2}{\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2} \right)^{1/2} \quad (12)$$

и в приближении Хюбнера-Рубенса

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{9,6 (\epsilon_1 - \epsilon_2 [1 + 0,53(\epsilon_2 + 2\epsilon_1)])}{(1 + 1,6\epsilon_2)(1 + 3,2(\epsilon_1 - \epsilon_2) + 2,56(\epsilon_1 + \epsilon_2)^2)} \quad (13)$$

Если микровключения в системе представляют собой шарики с покрытием, то для определения эффективного коэффициента излучательной способности проводится расчет эффективного коэффициента теплопроводности системы "среда + шарик с покрытием", а затем выполняется пересчет для эффективного коэффициента излучательной способности спая термопреобразователей термопары, например, в приближении Друде:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_2}{2^{1/2} \epsilon_{\text{eff}}} \left\{ \frac{\epsilon_2^2 \epsilon_4^2 \epsilon_2^2 + 2\epsilon_{\text{eff}} \left[\epsilon_2^2 (\epsilon_4^2 - \epsilon_2^2) - 4\epsilon_2^2 \epsilon_4^2 \right]}{\epsilon_2^2 (\epsilon_4^2 + \epsilon_2^2) - \epsilon_2^2 \epsilon_4^2} \right\} \quad (14)$$

Анализ условий, налагаемых на параметры термопары, при которых достигается минимальность методической погрешности измерений при высоких температурах

$$\delta T = \frac{T_2 - T_1}{d} \frac{3\epsilon_2^2}{\epsilon_2^2 + 2\epsilon_1^2} z \left[\frac{\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2}{3\epsilon_2^2} \frac{R^2}{z^2} (1 + \cos^2 \theta_1) - \left(1 - \frac{R}{z} \right) \left(1 - \frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1^2} - \frac{\epsilon_4^2 \epsilon_2^2}{\epsilon_2^2 \epsilon_4^2} \cos \theta_1 \right) + \frac{\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2}{3\epsilon_2^2} \right] \quad (15)$$

приводит к следующему: если $\epsilon_2 > \epsilon_4, \epsilon_3, \epsilon_1$, то $\theta_1 > \pi/2 (2n + 1)$

$$\theta_1 = \pi - \arccos \left(\frac{\epsilon_4^2 - \epsilon_2^2}{\epsilon_3^2 - \epsilon_2^2} \right)^{1/2} z = -R \left(\frac{\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2}{\epsilon_3^2 - \epsilon_2^2} \right)^{1/2} \epsilon_4 > \epsilon_3 \quad (16)$$

означающее, что если коэффициент излучательной способности больше коэффициентов излучательной способности спая термопреобразователей и самих термопреобразователей, то располагать термопреобразователи необходимо под тупым углом, при этом вдоль оси должен быть направлен преобразователь с меньшим ϵ .

если $\epsilon_2 < \epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_4$, то $\theta_1 < \pi/2(2n + 1)$

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{\epsilon_4^2 - \epsilon_2^2}{\epsilon_3^2 - \epsilon_2^2} \right)^{1/2} z = R \left(\frac{\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2}{\epsilon_3^2 - \epsilon_2^2} \right)^{1/2} \epsilon_4 > \epsilon \quad (17)$$

означающее, что если измерения проводятся в среде, в которой коэффициент излучательной способности меньше коэффициентов излучательной способности спая термопреобразователей и самих термопреобразователей, то располагать термопреобразователи необходимо под острым углом, при этом вдоль оси должен быть направлен термопреобразователь с большим ϵ .

В пятом разделе проведен анализ физических процессов, связанных с кинетикой испарения-конденсации на одиночной капле многокомпонентного раствора, подвешенной на термопаре.

В эксперименте исследовались растворы LiBr с 40% начальной весовой долей в воде, ацетоне и этаноле. Измерения размера и температуры капель помещенных в поток, начальный диаметр которых равнялся 1 мм, проводились при трех значениях относительной влажности потока (92%, 78%, 55%), соответственно, кривые 1-3 на рис.2а,б,в,г.

Уменьшение влажности потока приводит к уменьшению теплоприхода к капле неводного раствора за счет теплоты конденсации. При этом снижается скорость испарения летучего растворителя. Кроме того, уменьшение массового потока паров воды на каплю приводит к тому, что для равных времен наблюдения капля неводного раствора при более низких влажностях содержит меньшее количество воды и в меньшей степени влияет на снижение давления паров летучего растворителя. В конечном итоге этот процесс приводит к ускорению испарения летучего растворителя (начальный участок на кривых 1-3 рис 2б).

Анализ экспериментальных данных для водного раствора (рис.2а) показал, что расхождение между экспериментальным и теоретическим значениями линейной скорости роста капли составляет 25%.

Из анализа полученных в разделах 2-4 зависимостей учета минимальной методической погрешности измерения температур капель растворов в различных растворителях для проведения прецизионных температурных измерений в модельных экспериментах была выбрана медь-константановая термопара с углом в 138 град. между термопреобразователями, обеспечивающая минимальную методическую погрешность измерений $\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$ и проведено сравнение с методической погрешностью для тех же условий проведения опытов, но с углом меж-

ду термопреобразователями равным 30° . Как показала дальнейшая обработка экспериментальных результатов, использование медь-константановой термопарой с указанным углом между термопреобразователями дает возможность почти в два раза уменьшить погрешность измерений температуры по сравнению со стандартно используемыми в подобных экспериментах хромель-копелевых термопар с углом 30° . Справа, внизу на рис. 2в и 2г приведены доверительные интервалы измерений температуры: без оптимизации-угол 30° между термопреобразователями; прецизионные измерения-угол 138° для преобразователей медь-константановой термопары. Применение методики существенно (2 крат) понижает погрешность температурных измерений.

Сравнение кривых изменения диаметра капель 40% водного раствора LiBr (рис. 2а) и раствора в ацетоне (рис. 2б) со временем пока- зывает, что капля неводного раствора поглощает пары воды более эффективно, чем капля водного раствора бромата лития при тех же условиях в окружающей среде.

Зависимости температур капель раствора LiBr в ацетоне от времени при различных относительных влажностях окружающей среды (рис. 2г) показывают, что на начальной стадии испарения температура капли раствора уменьшается. На стадии роста капель конденсация капель водяных паров лимитируется в основном гигроскопическим веществом LiBr, которое более эффективно поглощает пары воды, будучи растворенным в ацетоне, и скорость роста температуры в этом случае, как видно из сравнения рис. 2б и 2г, выше. Аналогичный ход обнаруживают и температурные кривые для растворов LiBr в этаноле. Однако более низкое значение равновесного давления паров в этаноле приводит к более плавным зависимостям температуры капель от времени и, соответственно для них температурный эффект, менее выражен.

В качестве критерия сравнения эффективности неводных растворов по сравнению с водными было выбрано отношение массы воды, сконденсировавшейся на капле неводного раствора Δm_H , к массе воды, сконденсировавшейся на капле водного раствора Δm_B , как функция времени. Зависимости $\Delta m_H / \Delta m_B$ от времени для капель раствора LiBr в ацетоне и этаноле для трех значений относительной влажности также представлены на рис. 3а и 3б, соответственно. Возрастание с уменьшением влажности потока эффективности раствора LiBr в ацетоне по сравнению с водным раствором представляет практический интерес. Так, используя неводные растворы гигроскопических

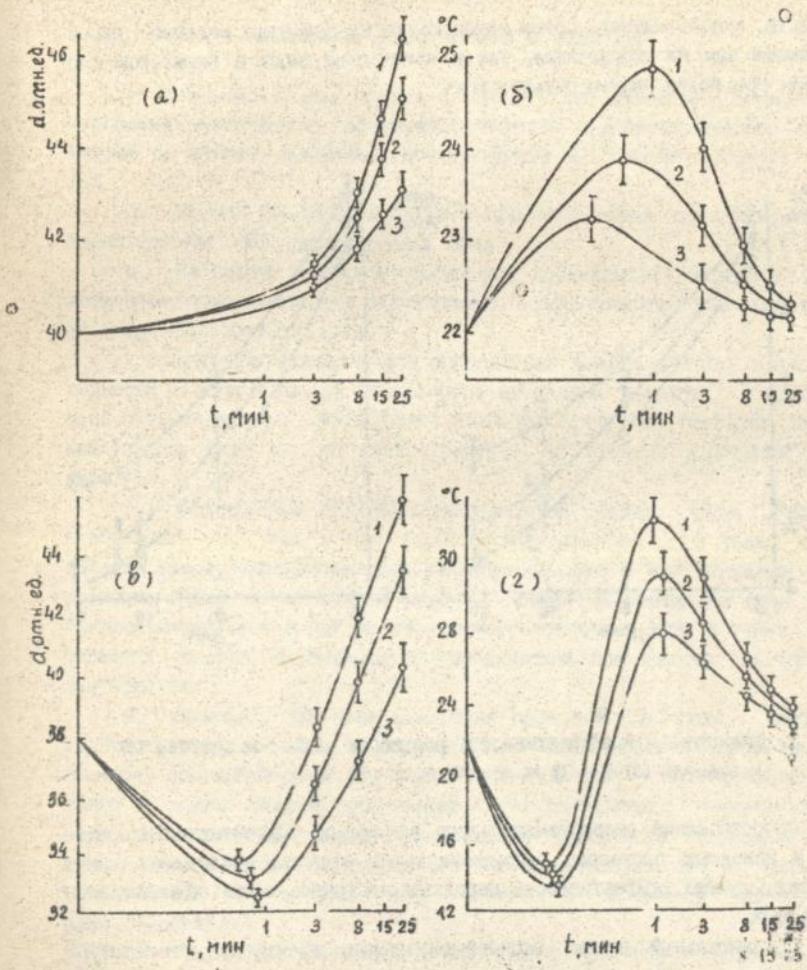


Рис.2. Изменение диаметра и температуры капель водного (а,б) и раствора LiBr в уксусной (в,г) с течением времени (1-92%, 2-78%, 3-55%)

веществ, можно вызвать более интенсивную конденсацию водяных паров уменьшая как их содержание, так и количество воды в капельном состоянии при более низких влажностях.

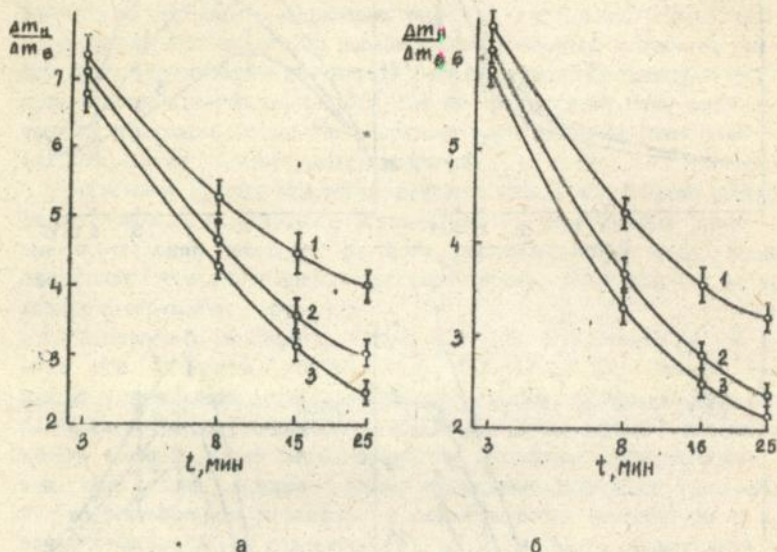
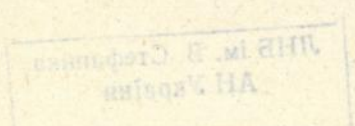


Рис. 3. Относительная эффективность растворов LiCl в ацетоне (а) и этаноле (б) (1 - 92 %, 2 - 78 %, 3 - 55 %).

Сопоставление экспериментальных данных по эффективности водных и неводных растворов гигроскопических веществ показывает, что во всех случаях эффективность неводных растворов выше эффективности водных.

Сравнительный анализ экспериментальных данных по температурным измерениям одиночных капель растворов показывает, что величина методической ошибки зависит от угла между элементами термопреобразователя. Так, минимальная ошибка (минимальная ширина доверительного интервала при одной и той же статистической выборке) наблюдается при величине угла между элементами термопреобразователя порядка 135°С - 140°С.



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен новый подход к оценке методической погрешности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями, основанный на анализе локальных температурных и концентрационных полей.

2. Решена проблема расчета и прогнозирования теплофизических характеристик микронеоднородных сред.

3. На основе принципа обобщенной проводимости получены аналитические выражения для эффективных коэффициентов теплопроводности микронеоднородных сред.

4. Получены формулы для определения коэффициентов теплопроводности и излучательной способности инородных веществ, покрывающих спай термопары. Исследовано влияние инородного покрытия (окисная пленка, сажа и т.п.) спаев термопары на точность измерения температуры.

5. Исследованы геометрические условия (радиус спаев термопреобразователей, угол между термопреобразователями), а также соотношения между коэффициентами теплопроводности и излучательной способности среды, в которой проводятся измерения, вещества спаев термопреобразователей и самих термопреобразователей, при которых достигаются условия минимальности методической погрешности измерения температуры.

6. Показано, что если измерения проводятся в среде, коэффициенты теплопроводности и излучательной способности которой больше (меньше) соответствующих значений вещества спаев термопреобразователей и самих термопреобразователей, то располагать термопреобразователи с целью достижения минимальной погрешности необходимо под тупым (острым) углом. При этом термопреобразователь с меньшим (большим) λ и ϵ размещают коллинеарно грядищу локального поля температур.

7. Разработанная методика внедрена в практику теплофизических измерений параметров конденсационного роста и испарения капель многокомпонентных растворов гигроскопических веществ в паровоздушной смеси атмосферного воздуха и паров воды.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Фисенко А.И., Григорьев С.В., Сааи Мейса. О методической погрешности определения температуры реальных тел контактным методом. ИФЖ, № 6, 1993. - С. 226-240.
2. Fisenko A.I., Saah Meisas. The heat conductivity of water solutions of surfactans. // 9 th International Symposium on Surfactant In Solution, - Varna, 1992.
3. Fisenko A., Saah Meisas. Determination of effective heat transfer coefficient in micellar water solutions of surfactans in vicinity of solid surface // Sixth International Conference on Organized Molecular Films. - Quebec, 1994.
4. Сааи Мейса. Определение коэффициента теплопроводности спаев термоземленгов /Одес. ун-т- Одесса, 1993. - 7с. Библ. 3.-Деп. в ГНТБ Украины, 17.03.93, № 547, УК 93.
5. Сааи Мейса. Определение излучательных и критериальных характеристик термопары при измерениях высоких температур. /Одес.ун-т. - Одесса, 1993.-8 с. Библ.: 3. - Деп. в ГНТБ Украины, 17.03.93, № 546, УК 93
6. Фисенко А.И. Сааи Мейса. Определение коэффициента теплопроводности однородных веществ с инородными включениями /Одес.ун-т.- Одесса, 1993. - 10с. Библ.: 3. - Деп. в ГНТБ Украины, 17.03.93, № 55, УК 93.

Мейса Сааі. Теплофізичні аспекти оптимізації температурних вимірювань термоелектричних перетворювачів,

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.14 - "Теплофізика і молекулярна фізика". Одеський державний університет. Одеса, 1994.

Робота містить в собі теоретичні дослідження умов і критеріїв, що вкладаються на термоелектричні термоперетворювачі, щоб досягти мінімум методичні похибки при вимірюванні температури контактним методом. Показано, що для того щоб досягти мінімуму методичної похибки необхідно використовувати термопари з різними радіусами спаю і кутом між термоперетворювачами.

Одержані аналітичні залежності для розрахунку і прогнозування теплофізичних характеристик мікронеоднорідних речовин і матеріалів.

Методика оптимізації температурних вимірювань, що розроблена в дисертації, опробувана в експериментальному дослідженні впливу процесів тепломасопередачу на кінетику фазових переходів першого роду на поодиноких краплях багатокomпонентних розчинів.

Ключові слова: термоперетворювачі, методична похибка, мікронеоднорідні речовини, теплофізичні характеристики.

Meisas Saah. Heatphysical aspects of optimization of temperature measurement with the help of thermoelectric transducers.

The dissertation to achieve the degree of Candidate of physic-mathematical sciences on speciality 01.04.14 Heatphysics and molecular physics. The Odessa I.I. Mechnikov State University. Odessa. 1994.

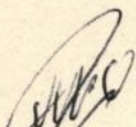
The work contains thermoelectrical investigations of conditions and criteria which are suprimposed on thermoelectric transducers to reach minimal methodical errors during measurement of temperature with the help of contact method.

On the bases of detailed investigations of geometrical conditions and correlations between thermophysical characteristics of measured medium and thermotransducers it is suggested to use thermocouples with different radii and angles between its elements.

Analytical dependences for calculation and pragnostication of thermophysical characteristics of micrononhomogetical substances and materials.

The method of temperature measurements optimization was approbated in thermophysical experiment on investigation of influence of heattransfer proceses on cinetics of first kind phase necessary to use thermocouples with different radiuses of solder and axes between thermotransducers. It was found analitical dependences for calculation and prediction of heatphysical characters of micro-nonhomogetical substance and material. The method of temperature optimization which was laborated in this dissertation, was used in experimental research of influence of heattransfer processes on single drops of compaund solutions.

Key words: thermotransducers, methodical error, heatphysics characters, micrononhomogetical substance.



ОГУ. Подпис. к пвч. 2. 11.94. Тир. 100. Згк. №87.

4561.90

AB 31.655