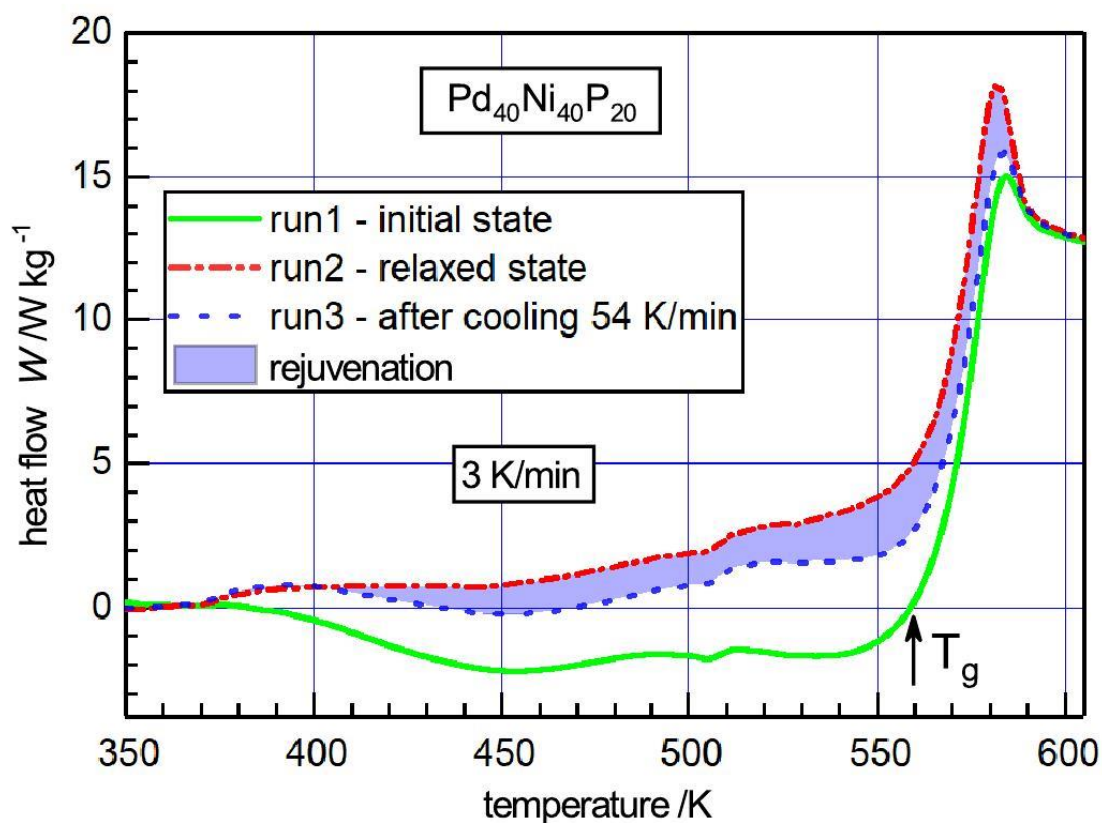


Г.В. Афонин, Ю.П. Митрофанов, В.А. Хоник

НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРАКТИКА

ЧАСТЬ 2



ВОРОНЕЖ

Воронежский государственный педагогический университет

2018

УДК 535(07)
ББК В22
А49

Издано по решению
учебно-методического совета ВГПУ.
Протокол №8 от 12 апреля 2018 г.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук,
профессор *С.Н. Дрождин* (ВГУ);

доктор физико-математических наук,
профессор *А.Ф. Клиньских* (ВГУ)

Научный редактор:

доктор физико-математических наук,
профессор *В.В. Свиридов*

Афонин Г. В.

А94 Научно-исследовательская практика. Часть 2: учебно-методическое пособие для студентов магистратуры физико-математического факультета, обучающихся по направлению 44.04.01 «Педагогическое образование», программа «Физическое образование» / Г.В. Афонин, Ю. П. Митрофанов, В.А. Хоник. – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2018. – 100 с.

В методических указаниях приводится описание установок и приборов, порядок выполнения, теоретическое обоснование, контрольные вопросы к научно-исследовательским работам.

Издание предназначено для студентов магистратуры физико-математического факультета, обучающихся по направлению 44.04.01 «Педагогическое образование», программа «Физическое образование».

УДК 535(07)
ББК В22

© Г.В. Афонин, Ю.П. Митрофанов, В.А. Хоник, 2018
© Воронежский государственный педагогический университет,
редакционно-издательское оформление, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей проведения научно-исследовательской работы является формирование специальных *профессиональных компетенций*:

- способность анализировать результаты научных исследований, применять их при решении конкретных научно-исследовательских задач в сфере науки и образования, самостоятельно осуществлять научное исследование (**ПК-5**);

- готовность использовать индивидуальные креативные способности для самостоятельного решения исследовательских задач (**ПК-6**);

- готовность осуществлять научное исследование в образовательной и научной области под квалифицированным руководством для умения находить место физическим законам в дидактическом материале по выполнению лабораторных и исследовательских работ по физике (**СК-4**).

Для формирования заявленных компетенций в ходе каждой работы студентам придется решать *ряд задач*, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления;

- объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;

- характеризовать, давать описание объекта исследования (образец, устройство, поток частиц, излучение) и выделять его особенности;

- объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении каждой конкретной работы;

- работать с приборами, выбирать нужный диапазон измерений (определять цену деления шкалы);

- проводить измерения, соблюдая заданные условия, грамотно и аккуратно записывать результаты в заранее составленные таблицы;

- вычислять и учитывать приборную и случайную погрешности прямых и косвенных измерений;

- представлять результаты эксперимента в виде сводных таблиц и графиков;

- определять параметры исследуемых функциональных зависимостей;

– анализировать полученные результаты, делать обоснованные выводы, составлять отчет по работе.

По результатам выполнения работ студент должен оформить отчеты в виде документа IvanovNIR1.doc (docx). После согласования отчета (в электронном виде) с руководителем НИР необходимо сдать его окончательную версию в бумажном виде и на CD-носителе. Кроме электронной версии отчета, на CD необходимо записать файл презентации, используемой на итоговой защите результатов НИР. Пример оформления отчета о НИР представлен в приложении.

Научно-исследовательская работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы:

– определить удельную теплоту плавления индия, олова, свинца.

В работе используются:

1. Дифференциальный сканирующий калориметр Seiko DSC 7020 Exstar;
2. Аналитические весы Radwag AS 60/220/C/2;
3. Кристаллы индия, олова, свинца.

Теоретическая часть

Общие сведения о дифференциальной сканирующей калориметрии

Термохимия — раздел физической химии, изучающий тепловые эффекты химических реакций, их закономерности в зависимости от различных физико-химических параметров. Главным методом этого раздела является калориметрия.

Термический анализ (калориметрия) — метод исследования физико-химических процессов, основанный на регистрации тепловых эффектов, сопровождающих превращения веществ в условиях программирования температуры.

Простой термический анализ имеет невысокую чувствительность. При малом удельном тепловом эффекте на единицу массы или при небольшом количестве превращающейся фазы перегибы на термических кривых, которые соответствуют фазовому превращению, становятся едва заметны, в таком случае эти превращения могут быть не обнаружены. Гораздо большей чувствительностью обладают дифференциальные методы, в основе которых лежит метод сравнения температур между измеряемым образцом и так называемым эталоном - термически стабильным материалом без фазовых переходов, с температурой плавления много выше интервала температур, в котором проводятся исследования.

Стоит отметить, что за основу работы всех дифференциальных термических методов взята схема, которая была предложена еще в 1903 году Н.С. Курнаковым, впоследствии получившая название - пирометр Курнаков (рис. 1).

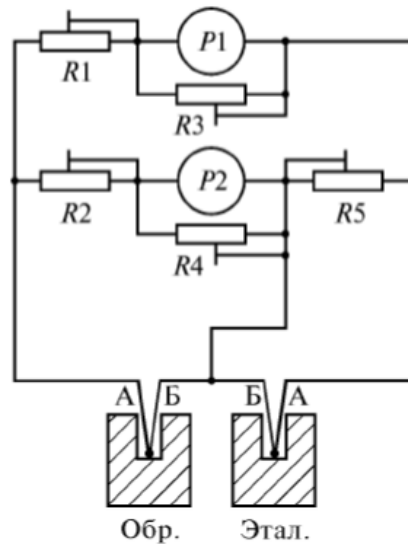


Рис. 1 – Принципиальная электрическая схема пирометра Н.С. Курнакова.

Для измерения разности температур между образцом и эталоном используют дифференциальную термопару, состоящую из двух простых термопар, включенных последовательно путем соединения одноименных проволок (А и В). Один из горячих спаев дифференциальной термопары помещают в центр образца, а другой в центр эталона. При нагреве спаев термопар, находящихся в образце и эталоне, возникает термоЭДС, в цепи появляется электрический ток, вызывающий поворот рамок гальванометров (Р1 и Р2) и соединенных с ними зеркалец. Лучи света, направляемые на зеркальца от специальных осветителей, отражаются от них и отклоняются при повороте зеркалец. Отраженные лучи проходят через цилиндрическую линзу, собираются в точки и попадают на фотобумагу, закрепленную на вращающемся барабане. В результате на фотобумаге записываются кривые зависимостей температуры образца и разности температур образца и эталона от времени.

Схема Н. С. Курнакова, за исключением способа измерения тока дифференциальной термопары, сохранилась практически неизменной до наших дней.

В методе (ДСК) теплоту определяют через тепловой поток – производную теплоты по времени (отсюда в названии термин «дифференциальный»). Тепловые потоки измеряются по разнице температур в двух точках измерительной системы в один момент времени:

$$\Phi \sim \Delta T = T(x_2) - T(x_1) = f(x).$$

Измерения можно проводить как в изотермических условиях, так и в динамическом режиме при программируемом изменении температуры оболочки (нагревателя) (калориметры такого типа называют «сканирующими»). В современных приборах предусмотрена возможность задавать различные температурные программы.

Этот метод позволяет фиксировать так называемые кривые нагревания (или охлаждения) исследуемого образца, т.е. изменение температуры последнего во времени. В случае какого-либо фазового превращения первого рода в веществе (или смеси веществ) происходит выделение или поглощение теплоты и на кривой (термограмме) появляются площадка или изломы.

Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) применим при решении таких проблем, как определение температур и теплоты фазовых превращений, определение теплоемкости веществ, определение содержания примесей в веществе, а также в отдельных случаях можно определить кинетические параметры химической реакции.

Принцип действия и устройство измерительной системы ДСК

Все ДСК (рис. 2) имеют две измерительные ячейки: одна из которых предназначена для исследуемого образца (*sample, S*), другая – ячейка сравнения (*reference, R*) предназначена для помещения в нее либо пустого тигля, либо тигля с образцом сравнения – эталоном (инертным в заданном диапазоне условий веществом, по теплофизическим свойствам близким к образцу). Ячейки конструируют максимально симметрично (одинаковые тигли, одинаковые сенсоры, одинаковое расстояние от нагревателя (*furnace, F*) до сенсора и т.д.).

В методе ДСК между тиглем и термопарой находится теплопроводящая колонка, которая позволяет измерять усредненную температуру со всей площади тигля.

Экспериментально измеряется временная зависимость разницы температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения.

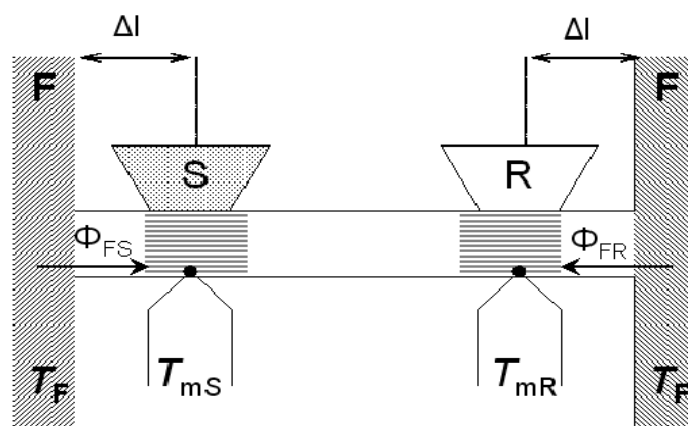


Рис. 2 – Схема измерительной системы ДСК. F-нагреватель, S-образец, R-эталон, T_f, T_{ms}, T_{mr} – температуры нагревателя и спаев дифференциальной термопары образца и эталона, Φ_{fs}, Φ_{fr} – тепловые потоки.

Образец или эталон нагреваются или охлаждаются с одинаковой скоростью, причем их температуры поддерживаются постоянными. Экспериментальные кривые представляют собой зависимость теплового потока $\frac{\partial H}{\partial t}$ от температуры.

В большинстве случаев образец находится внутри контейнера или тигля, который, в свою очередь, находится в контакте с сенсором, измеряющим соответствующее свойство. При этом датчик фиксирует температуру в течение всего процесса в непосредственной близости от образца. Система датчиков с образцом (ячейка) находится внутри печи в заданной атмосфере.

Управление печью осуществляется с помощью программатора температур, и в зависимости от требуемой задачи температуру печи можно увеличивать, уменьшать или поддерживать постоянной.

Зависимость измеренного свойства от температуры, которую записывают датчики, после обработки выводится на экран компьютера в виде термоаналитической кривой.

Подготовка образцов для измерений методом ДСК

К калориметрическим исследованиям допускаются любые твердые и жидкие вещества, которые неагрессивны к материалу тигля. Для того, чтобы результаты измерения были наиболее устойчивы, масса образца должна быть не менее 4 мг, максимальная масса навески ограничена объемом тигля. Масса исследуемого материала выбирается в соответствии с поставленной задачей. Чем

больше масса образца, тем интенсивнее сигнал калориметра, а значит меньше погрешность, вносимая внешними факторами.

Однако следует учитывать, что чем больше количество исследуемого вещества, тем выше в его объеме градиент температур, тем более размыты на кривых ДСК наблюдаемые термические аномалии, и тем меньше точность измерения температуры и теплоты.

Общие требования к образцам, используемым для измерений методом ДСК:

1. Образец не должен взаимодействовать с материалом измерительной ячейки и защитным газом, если данное взаимодействие не является предметом изучения.

2. Необходимо предотвратить переход образца в газовую фазу, если его сублимация или испарение не являются предметом изучения. С этой целью эксперименты, как правило, проводят в герметично завальцованных ячейках. В тех случаях, когда образец нагревают до температур, превышающих 100 – 150°C, в крышке делают небольшое отверстие чтобы избежать деформации ячейки в результате повышения внутреннего давления.

3. Необходимо обеспечить хороший тепловой контакт между образцом и сенсором. Для этого нужно подобрать ячейку с плоским недеформированным дном и плотно поместить пробу на дне ячейки.

Твердые поликристаллические препараты желательно спрессовать. Из сплошных материалов типа пленок и резин обычно вырезают тонкий образец нужного диаметра.

4. Масса образца подбирается в соответствии с поставленной задачей. Следует учитывать, что чем толще слой пробы в ячейке, тем выше нежелательный градиент температур в ее объеме. Взвешивать образец необходимо с точностью не менее 10^{-2} мг.

5. Необходимо обеспечить репрезентативность пробы. Жидкие образцы перед помещением в измерительную ячейку следует тщательно перемешивать. Небольшие количества пробы твердых поликристаллических препаратов берут из разных частей, после чего также тщательно перемешивают.

Экспериментальные кривые ДСК

При наличии в исследуемом образце каких-либо процессов, или переходов первого рода, связанных с поглощением или выделением тепла (плавление, структурный фазовый переход, испарение и др.), на кривых ДСК проявляются характерные пики и аномалии, исследова-

ние которых дает информацию о процессах, протекающих в образце. Различают экзотермические (выделение тепла) и эндотермические (поглощение тепла) аномалии ДСК (рис. 1.3).

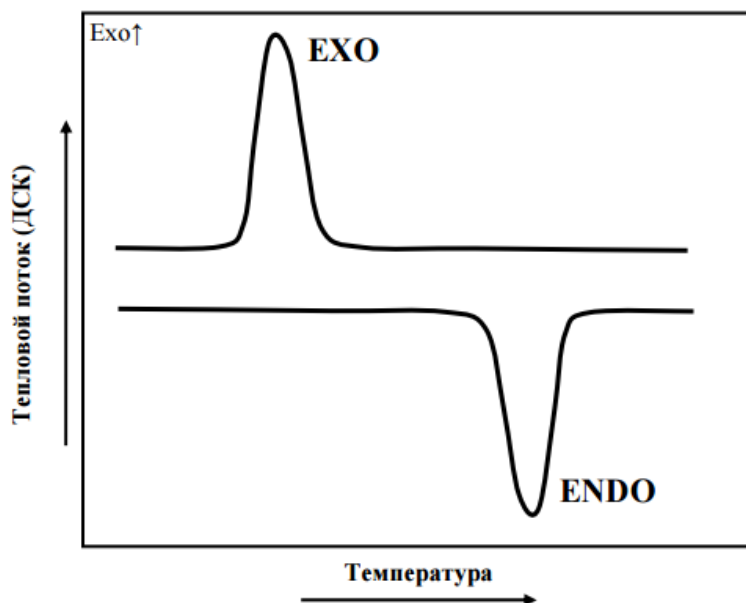


Рис. 3 – Эндотермический и экзотермический пики на кривой ДСК.

Любая аномалия (пик) ДСК полностью может быть описана следующими параметрами (рис. 4):

1. Температурами начала пика, которая характеризует начало процесса, и окончания пика (T_1 и T_2 на рис. 4, определяются как точки пересечения касательных основной (базовой) линии ДСК и плеч пика).

2. Температурой максимума (минимума) пика (T_3 на рис. 4), которая характеризует окончание процесса.

3. Площадью пика, которая определяет энтальпию (удельную теплоту) процесса $J = Q/M$, где Q – количество поглощенного/выделенного тепла, M - масса исследуемого вещества.

4. Воспроизводимостью пика при охлаждении и последующем нагреве. Наличие воспроизводимости свидетельствует об обратимости фазового перехода. Если термическая аномалия не воспроизводится при повторном нагреве образца, это признак необратимого фазового перехода.

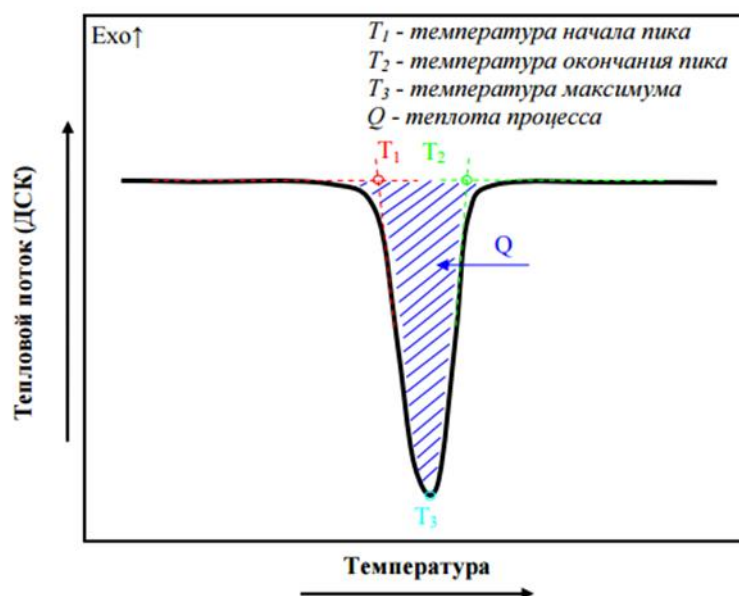


Рис. 4 – Обработка аномалии ДСК.

Метод ДСК универсален и может использоваться самостоятельно, но для верной интерпретации применяется в совокупности с различными методами.

Интерпретация данных ДСК в общем случае может представлять собой достаточно сложную задачу, особенно в случае присутствия на кривой нескольких термических аномалий, для решения которой требуется привлечение дополнительных методов исследований: дифракционных, оптических, диэлектрических, спектроскопии и пр. Однако в отдельных случаях, таких как плавление вещества или испарение некоторой его части, достаточно простого визуального осмотра образца после измерения.

Анализ экспериментальных данных

Различные тепловые эффекты хорошо можно наблюдать и при термообработке металлических стекол (МС). Первые два из них обусловлены структурной релаксацией в стеклообразном состоянии, которая определяет:

- 1) выделение теплоты при температуре ниже температуры стеклования T_g ;
- 2) поглощение теплоты выше температуры стеклования T_g в состоянии переохлажденной жидкости.

Третий тепловой эффект обусловлен кристаллизацией стекла, приводящей к сильному тепловыделению.

В то же время физическая природа всех трех тепловых эффектов до сих пор остается неясной и является вопросом широких дискуссий.

На рис.5 в качестве примера показаны результаты ДСК - измерений в металлическом стекле $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ при скорости нагрева 30 К/мин, где эксперимент 1 соответствует исходному состоянию. Калориметрические измерения проводились в проточной аргоновой среде с помощью дифференциального сканирующего калориметра Hitachi DSC 7020.

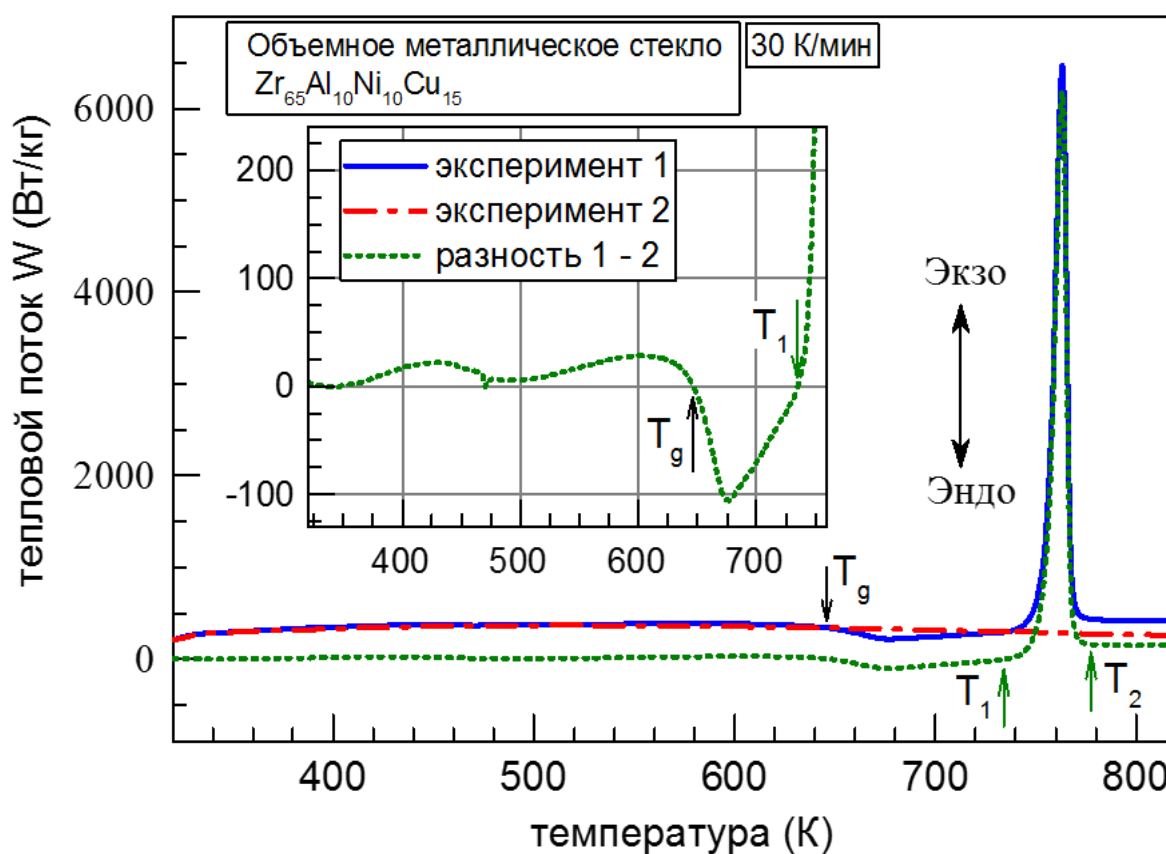


Рис. 5 – Результаты калориметрических измерений (ДСК) в стекле $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ в исходном состоянии (эксперимент 1), после полной кристаллизации (эксперимент 2) и разность этих измерений. На вкладке показана разность в увеличенном масштабе. Вертикальными стрелками до и после кристаллизационного пика показаны температуры, которые взяты как пределы интегрирования при вычислении тепловыделения при кристаллизации. Температура стеклования обозначена на рисунке стрелкой.

Наблюдаются все три обозначенных выше тепловых эффекта:

- тепловыделение ниже температуры стеклования T_g (смотрите вкладку на рисунке);
- теплопоглощение вблизи $T_g \approx 652K$ в состоянии переохлажденной жидкости;
- большой кристаллизационный пик тепловыделения, который начинается вблизи $735K$ и центр которого при температуре $\approx 764K$.

Температурная зависимость теплового потока в эксперименте 2 (после полной кристаллизации в результате нагрева до 870 К) не имеет каких-либо ярко-выраженных эффектов и представляет собой почти ровную линию.

На рис. 6 приведены примеры температурных зависимостей разностного теплового потока и величин теплового эффекта при нагреве до температур 673 и 773 К. Теплота кристаллизации после нагрева выше первого (основного) кристаллизационного пика составляла 36.5 ± 2 Дж/г, или 0.34 Дж/м³ (при $\rho = 9,3$ г/см³).

Тепловые эффекты измерялись с помощью ДСК на приборе Hitachi DSC 7020 в проточной среде аргона. Характерная масса образцов составляла ~ 40 мг. Измерения осуществлялись при скорости нагрева 5 К/мин.

Теплота кристаллизации определялась на основе ДСК-измерений. Схема измерений состояла в следующем. В первом цикле образец нагревался до температуры стеклования и затем охлаждался до комнатной примерно с той же скоростью, чтобы получить релаксированное состояние. Во втором цикле образец нагревался выше температуры кристаллизации (до 673 или 773 К). В третьем цикле образец повторно нагревался до той же температуры. В двух последних циклах измерялся тепловой поток W .

Тепловой эффект вычисляется по формуле

$$Q = \frac{1}{\dot{T}} \int_{T_R}^T (W_2 - W_3) dT$$

где T_R – комнатная температура, а \dot{T} – скорость нагрева.

В ряде случаев проводился четвертый цикл измерений, результаты которого продемонстрировали совпадение величин $W_3(T)$ и $W_4(T)$ в пределах точности измерений.

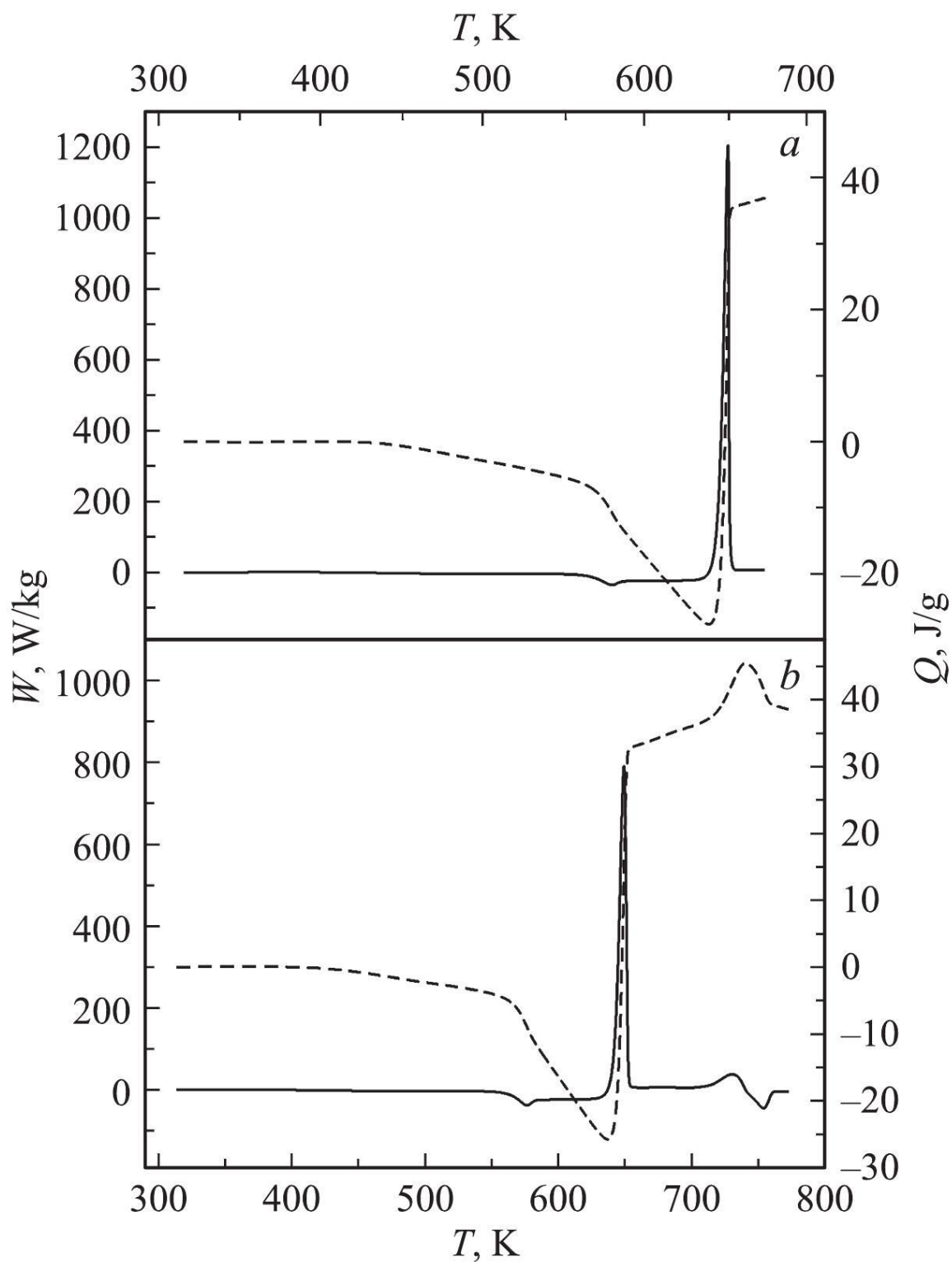


Рис. 6 – Тепловые эффекты, возникающие при нагреве до 673 (а) и до 773 К (б) объемного металлического стекла $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$: дифференциальный тепловой поток $W(T)$ (сплошная линия) и суммарный тепловой эффект $Q(T)$ (штриховая линия).

Определение теплоты плавления с помощью ДСК

Переход кристаллического тела в жидкое состояние происходит при определенной для каждого вещества температуре и требует затраты некоторого количества тепла, называемого теплотой плавления.

Поскольку плавление является фазовым переходом первого рода и сопровождается поглощением теплоты, это явление может быть зафиксировано методом ДСК, поскольку известно, что в случае какого-либо фазового превращения первого рода в веществе (или смеси веществ) происходит выделение или поглощение теплоты, и на кривой (термограмме) появляются площадка или изломы.

Простой термический анализ имеет невысокую чувствительность. При малом удельном тепловом эффекте на единицу массы или при небольшом количестве превращающейся фазы перегибы на термических кривых, соответствующих превращению, становятся едва заметными и такие превращения могут быть не обнаружены. Гораздо большей чувствительностью обладают дифференциальные методы в основе которых лежит метод сравнения температур между измеряемым образцом и так называемым эталоном - термически стабильным материалом, без фазовых переходов, с температурой плавления много выше интервала температур, в котором проводятся исследования.

Измерительная камера ДСК состоит из двух ячеек: в одной - 2 (*sample*) находится исследуемый образец, в другую ячейку - 1, называемую ячейкой сравнения (*reference*), помещают эталон.

Экспериментально измеряется временная зависимость разницы температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения.

На кривой ДСК плавление и кристаллизация наблюдаются соответственно при нагревании и охлаждении как интенсивные эндотермический и экзотермический пики.

Сигнал ДСК пропорционален изобарной теплоемкости – производной энтальпии по температуре. По температурной зависимости энтальпии системы можно определить форму экспериментальной кривой ДСК, характерную для того или иного вида фазовых переходов в системе.

До начала плавления температуры образца и эталона совпадают. Во время плавления температура образца не изменяется. Образец принимает тепло. Температура эталона продолжает возрастать.

Разница температур возрастает до полного плавления металла. Температура образца затем принимает значение температуры эталона. Разница температур сокращается. Далее температуры образца и эталона снова совпадают.

Процесс плавления и кристаллизации сопровождается характерными изменениями формы образца, поэтому определить какая изотермических аномалий ДСК отвечает за процесс плавления достаточно просто с помощью визуального осмотра образца после измерения.

В большинстве случаев по кривым ДСК можно также определить тип плавления вещества:

1) *конгруэнтное плавление* (плавление без разложения; состав расплава совпадает с составом твердой фазы) - пики плавления и кристаллизации воспроизводятся при повторных нагревах, пик кристаллизации выражен одной аномалией ДСК, площади пиков плавления и кристаллизации равны;

2) *инконгруэнтное плавление* (плавление с разложением; твердая фаза преобразуется в расплав и твердую фазу другого состава) - пик плавления не воспроизводится при повторном нагреве, процесс кристаллизации выражен не одной, а несколькими аномалиями ДСК.

На рис. 7 приведен пример экспериментальной температурной зависимости теплового потока для образца индия чистотой 99,999% при нагреве со скоростью 3 К/мин. На термограмме виден ярко выраженный эндотермический тепловой эффект, связанный с процессом плавления индия. Этот эффект показан на дополнительной вкладке рисунка в увеличенном масштабе. На вкладке также показана стрелкой температура плавления индия $T_{пл} = 429.6K$ ($156.45^{\circ}C$), соответствующая началу эндотермического эффекта.

Площадь этого пика равна теплоте плавления этого образца

$$Q_{пл} = \int_{T_1}^{T_2} \Delta W dT / \dot{T} , \quad (1)$$

где \dot{T} – скорость нагрева, T_1 и T_2 – температуры непосредственно перед пиком и сразу после пика, соответственно.

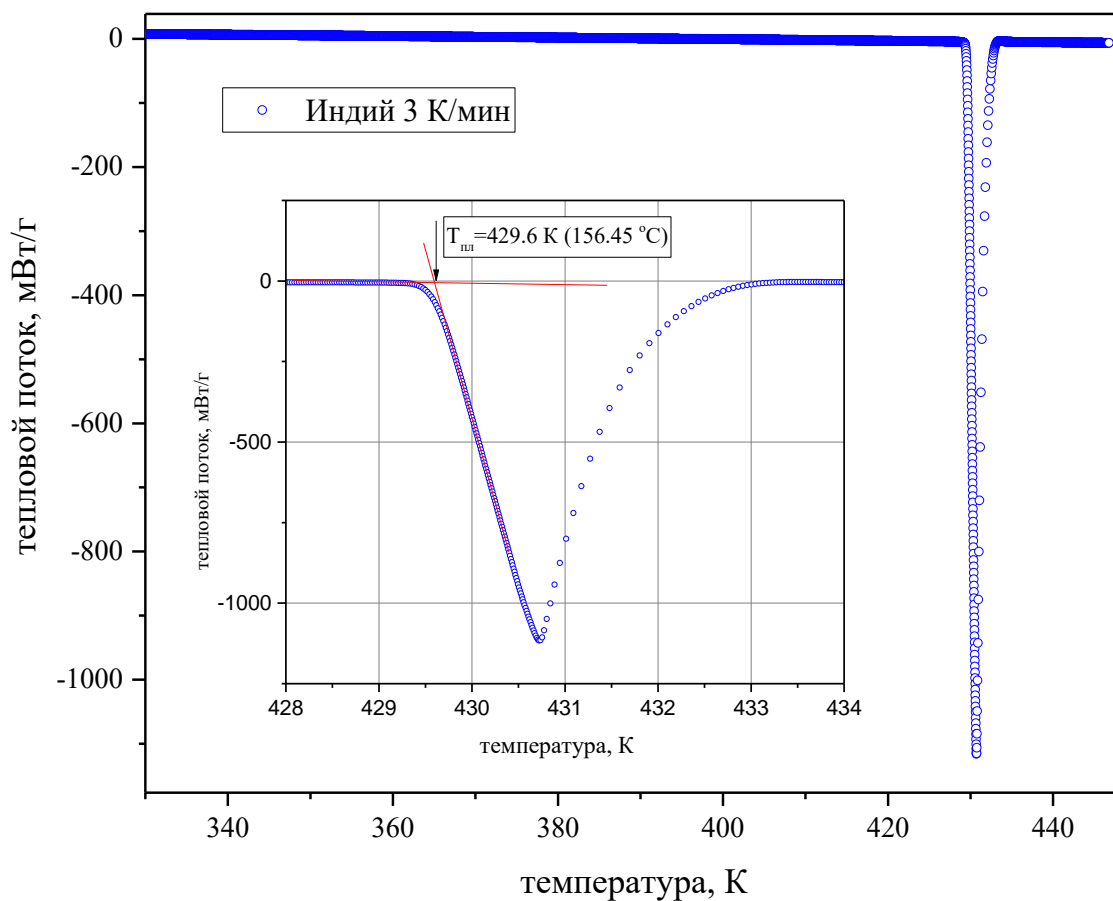


Рис. 7 – Экспериментальная термограмма ДСК для кристалла индия.

Определение значений теплоты структурной релаксации и кристаллизации металлических стекол

В качестве примера интерпретации более сложных экспериментальных термограмм ДСК на рис. 8 показаны данные ДСК объёмного металлического стекла $\text{Zr}_{46}\text{Cu}_{46}\text{Al}_8$ в исходном состоянии при скорости нагрева 7.5 К/мин. Калориметрические исследования были проведены с помощью прибора Perkin-Elmer Diamond DSC.

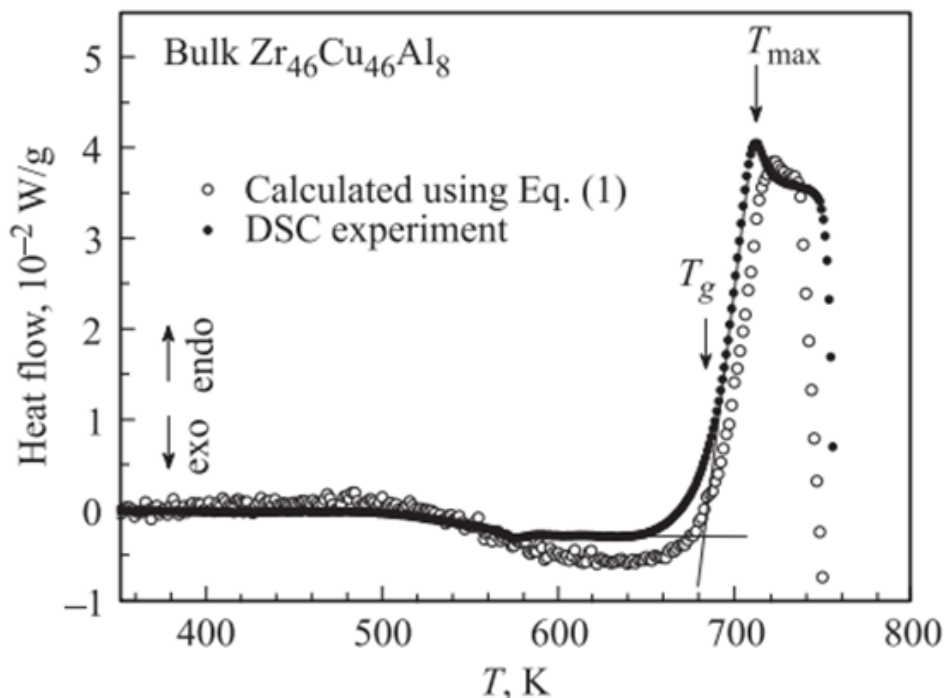


Рис. 8 – Экспериментальная термограмма ДСК объёмного металлического стекла $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$ при скорости нагрева 7.5 К/мин (темные кружки). Стрелкой показана температура стеклования T_g .

В области 500 К начинается экзотермическая реакция, обусловленная структурной релаксацией стекла. Вблизи 680 К экзотермическая реакция сменяется эндотермической, что соответствует переходу стекла в состояние переохлажденной жидкости. Температура стеклования T_g , определенная как начало эндотермической реакции (показана стрелкой), составила 683 К. Резкое снижение теплопоглощения, начинающееся в области 759 К, обусловлено началом экзотермической кристаллизации.

На следующем рисунке представлены результаты измерений теплового потока в свежеприготовленном объемном металлическом стекле $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ (рис. 9). Здесь можно наблюдать мощный экзотермический эффект при температурах 640 К – 740 К. Этот тепловой эффект связан с кристаллизацией стекла. Определив площадь области под пиком (по формуле 1), получим теплоту кристаллизации этого металлического стекла.

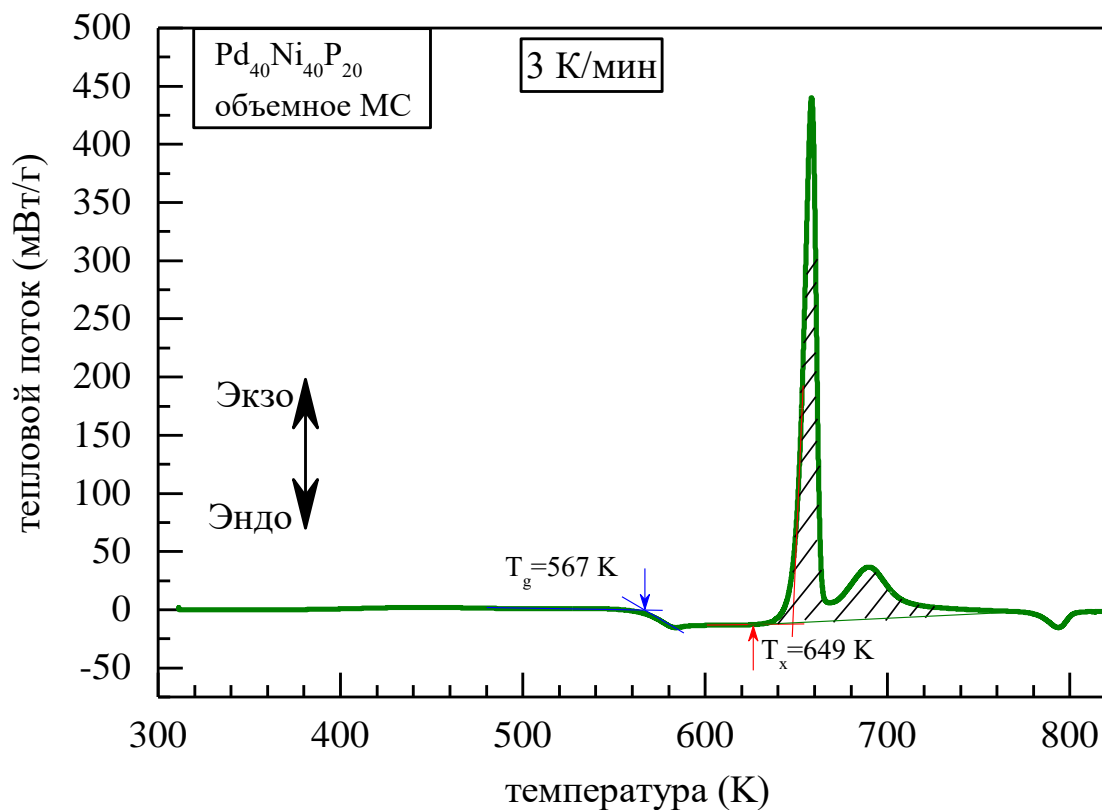


Рис. 9 – Экспериментальная термограмма ДСК объёмного металлического стекла $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$ при скорости нагрева 3 К/мин. Стрелкой показана температура стеклования T_g и температура кристаллизации T_x .

В настоящей лабораторной работе планируется выполнение измерений только для кристаллов чистых химических элементов. Расчет теплоты плавления нужно будет проводить, как с помощью формулы (1), так и с помощью специального алгоритма в программном обеспечении Muse Standard Analysis. В таблице 1 представлены литературные значения теплоты плавления, а также температуры плавления для индия (In), олова (Sn или Tin) и свинца (Pb).

Таблица 1

Химический элемент	Температура плавления, °С	Температура плавления, определенная в работе с помощью ДСК, °С	Энтальпия плавления, J/g			Энтальпия плавления, определенная в работе с помощью ДСК, J/g	Молярная теплота плавления, определенная в работе с помощью ДСК, J/mol	Отклонение значения от литературных данных, %		
			I, [10]	II, [11]	III, [12]			I	II	III
In	156.6		28.44	28.57	28.47					
Sn	231.9		60.67	59.21	60.65					
Pb	327.5		23.06	23.02	24.71					

Практическая часть

Описание измерительного оборудования

1. Дифференциальный сканирующий калориметр Seiko DSC 7020 Exstar.
2. Персональный компьютер, используемый для автоматических измерений и обработки данных.
3. Источник бесперебойного питания, необходимый для непрерывной работы компьютера.
4. Баллон с инертным газом – аргоном (азотом), регулятор давления и ротаметр.
5. Пинцет.

6. Пресс для холодной сварки тиглей.

7. Аналитические весы Radwag AS 60/220/C/2, используемые для определения массы образца.

Дифференциальный сканирующий калориметр Seiko DSC 7020 Exstar благодаря большому разнообразию систем охлаждения позволяет проводить измерения тепловых эффектов в широком диапазоне температур от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $725\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Также особая конструкция печи и регулятора нагрева значительно повышает стабильность базовой линии и чувствительность, а низкий уровень шума и стабильность базовой линии позволяют осуществлять измерения образцов малой массы.

Широкий диапазон измерений и использование контейнеров для измерения под давлением делают инструмент пригодным для широкого спектра применений, включая оценку безопасности образцов.



Рис. 10 – Аналитические весы Radwag AS 60/220/C/2.

Аналитические весы AS 60/220/C/2 (рис. 10) предназначены для статических измерений массы в лабораторных условиях и рекомендованы для использования в сфере государственного технического регулирования.

Точность весов и результатов измерений составляет 0,01 мг и обеспечивается за счет функции внутренней автоматической настройки, которая анализирует температурные и временные изменения.

Отличительной чертой весов является современный удобный LCD экран, который обеспечивает более четкое отображение результатов взвешивания.

Весы отвечают самым высоким метрологическим требованиям, имеют высокую точность и стабильность результатов измерений.

Прежде чем приступить к работе с весами, необходимо произвести их калибровку. Для этого следует нажать на клавишу 1 запуска внутренней калибровки весов «CAL» (рис. 11).

Как только на дисплее весов появится знак 2, можно производить взвешивание (рис. 11).



Рис. 11 – Панель управления весов Radwag AS 60/220/C/2.

Установка образца и выполнение эксперимента

1. Включите компьютер, источник бесперебойного питания, затем калориметр Seiko DSC 7020 Exstar, нажав на кнопку «ON» (рис. 12).



Рис. 12 – Внешний вид Seiko DSC 7020 Exstar.

2. Определите массу образца с помощью аналитических весов, заранее выполнив калибровку прибора (рис. 11). Проведите не менее пяти измерений. Рассчитайте среднюю массу образца.
3. Поместите образец в тигель (*Sample Pan*) (рис. 13).



Рис. 13 – Внешний вид тиглей.

4. Закройте тигель с образцом крышкой (*Crimped Cover*) (рис. 14).



Рис. 14 – Внешний вид крышек для тиглей.

5. Запрессуйте тигель с помощью пресса, до упора повернув рукоятку против часовой стрелки (рис. 15).



Рис. 15 – Пресс для холодной сварки тиглей.

Таким образом, обеспечивается максимально возможная область контакта между исследуемым образцом и дном тигля.

6. Снимите крышку измерительной системы ДСК (рис. 16). Затем последовательно снимите крышку 1 и 2 (рис. 17, 18). Далее можно наблюдать ячейку измерительной камеры ДСК (рис. 19).



Рис. 16 – Внешний вид Seiko DSC 7020 Exstar.



Рис. 17 – Крышка 1 измерительной камеры Seiko DSC 7020 Exstar.



Рис. 18 – Крышка 2 измерительной камеры Seiko DSC 7020 Exstar.

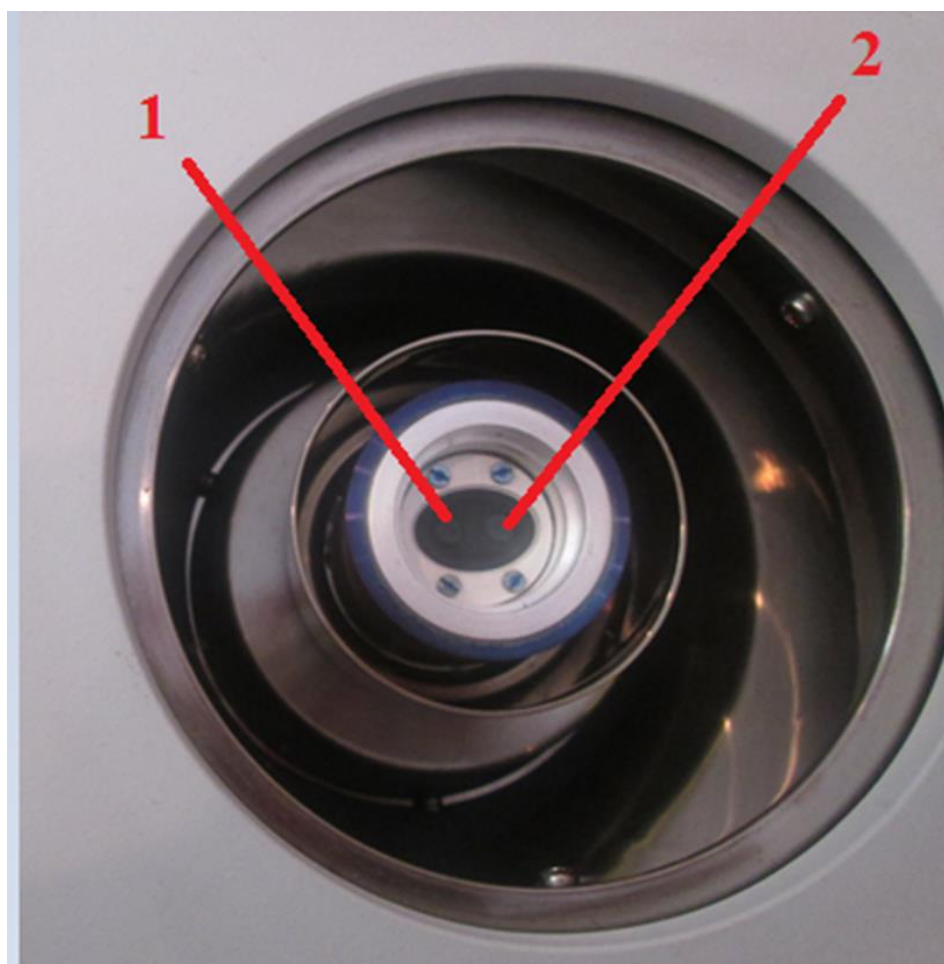


Рис. 19 – Ячейка измерительной камеры ДСК.

7. Поместите эталонный образец - порошок Al_2O_3 (Alumina) в алюминиевом тигле в ячейку сравнения (*reference*) (рис. 20).



Рис. 20 – Пример установки эталонного образца.

8. Поместите исследуемый образец (рис. 21) в ячейку, предназначенную для исследования образца (*sample*) (рис. 22). Во избежание загрязнения тиглей и образцов, следует воспользоваться пинцетом.

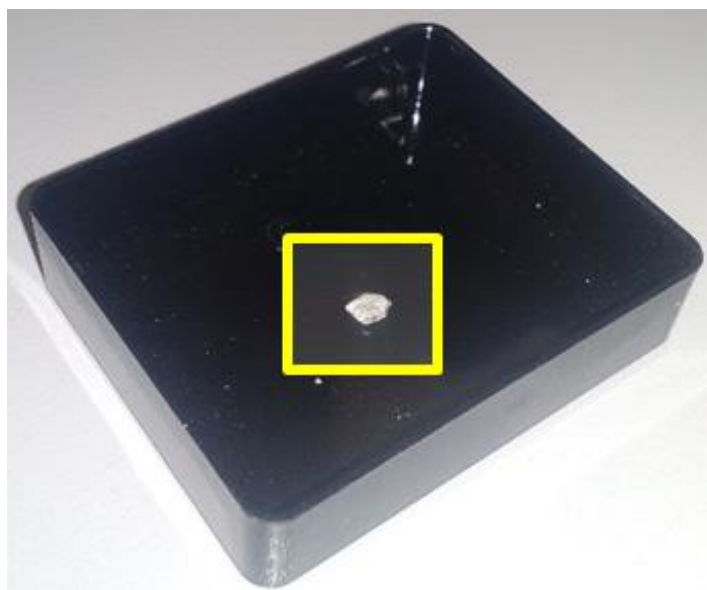


Рис. 21 – Пример исследуемого образца – олово (Sn).



Рис. 22 – Пример установки исследуемого образца.

9. Установите крышки измерительной системы ДСК в обратной последовательности (пункт 6).

10. Для предотвращения окисления образцов все измерения необходимо производить в проточной среде инертного газа. Откройте подачу аргона из баллона, повернув вентиль на баллоне против часовой стрелки.

11. Вращением вентиля по часовой стрелке регулятора давления *A-Flow* установите давление 0,5 бар (рис. 23).



Рис. 23 – Пример установки давления.

12. Поворачивая вентиль поплавкового ротаметра *KOFLOC* против часовой стрелки, установите значение расхода газа 80–100 мл/мин (рис. 24).



Рис. 24 – Внешний вид расходомера.

13. Запустите программу измерений ДСК «*Measure*». В левом верхнем углу окна программы появится запись «Linking», сообщающая об установлении соединения с калориметром (рис. 25).

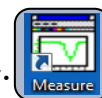


Рис. 25 – Процесс соединения ПК с калориметром.

14. О том, что соединение компьютера с калориметром успешно установлено, сообщит надпись «Ready» (рис. 26). В окне программы станут активными все инструменты для управления измерениями и настройками отображения результатов, а также отобразится информация о температуре образца, температуре эталона, программной температуре (задатчике), текущем тепловом потоке и производной теплового потока по времени.

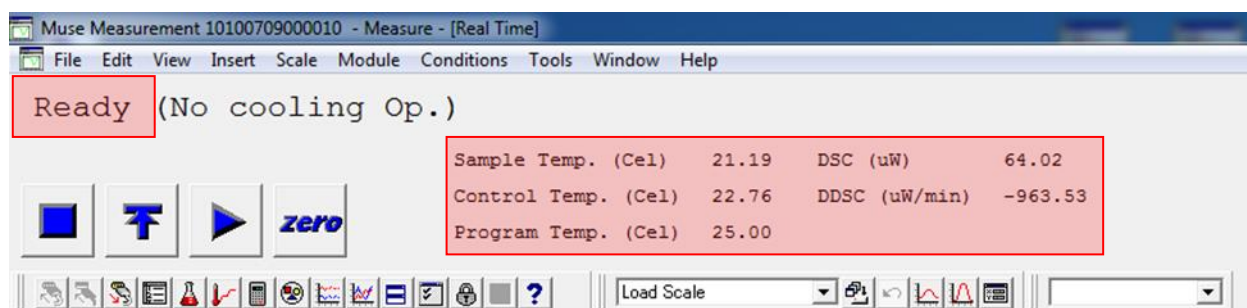


Рис. 26 – Соединение ПК с калориметром успешно установлено.

15. Нажмите на кнопку «Редактор условий» (*Condition editor*) (рис.27), затем в появившемся меню программы введите название исследуемого образца (*Sample Name*), его массу в миллиграммах (*Sample Weight*). Аналогично введите данные для эталонного образца.

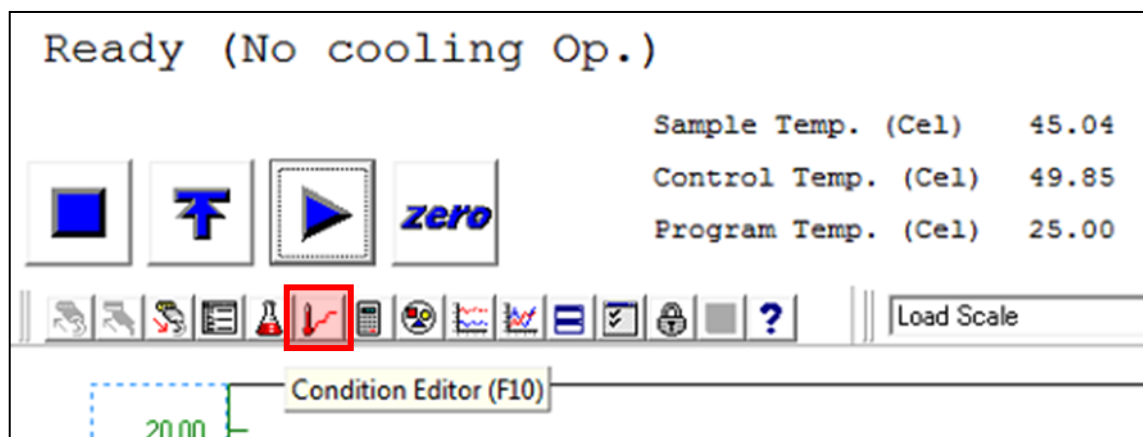


Рис. 27 – Кнопка «Редактор условий» для вызова меню программы.

16. Впишите название файла для сохранения будущих результатов измерений в поле «Имя файла» в виде: название исследуемого образца, скорость нагрева, номер эксперимента (например, *Sn 10Kmin 20170301 exp1*, рис. 28).

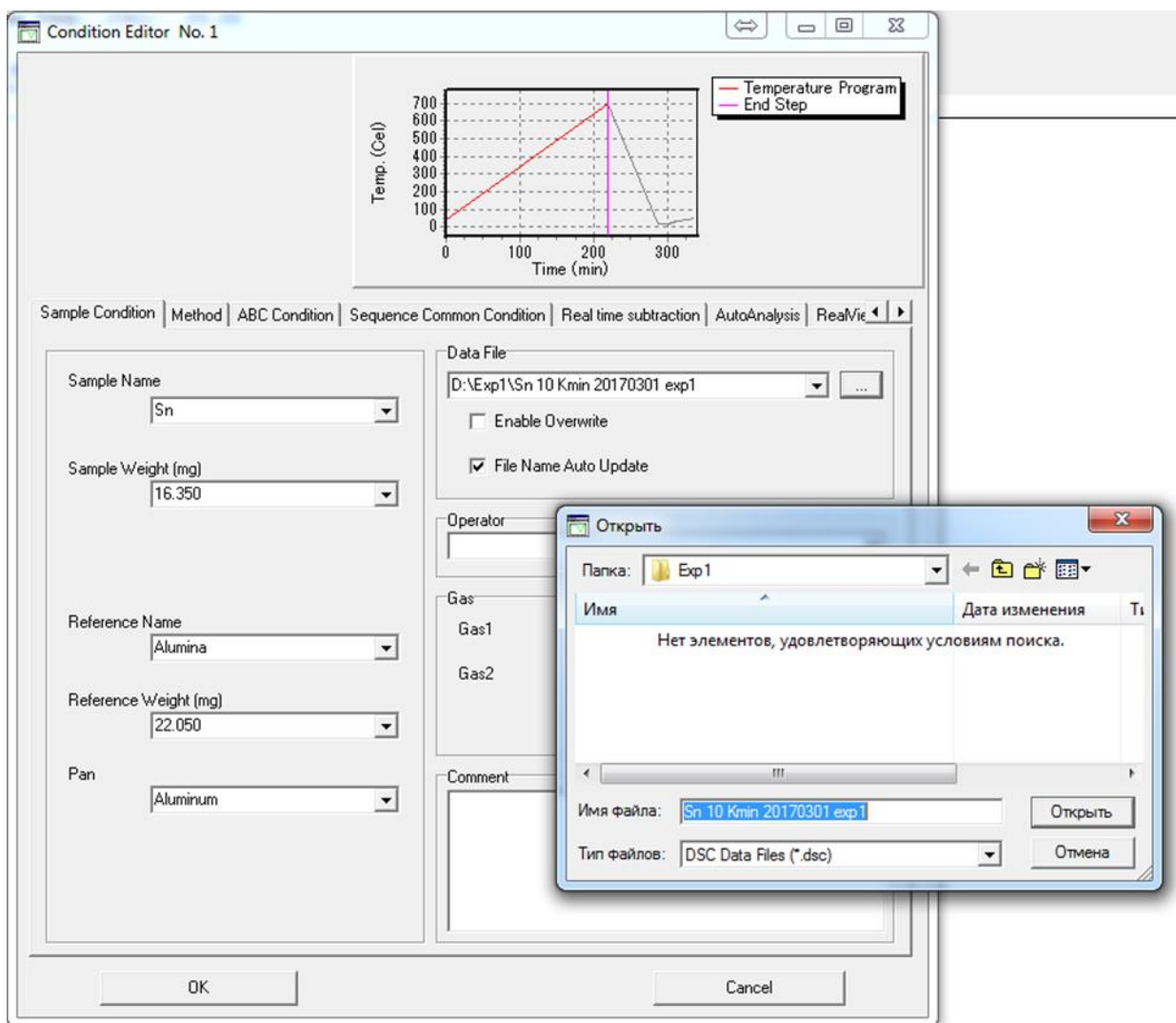


Рис. 28 – Окно программы для ввода параметров образца и выбора имени и пути к файлу для записи экспериментальных данных.

17. Перейдите на вкладку «Method». Здесь необходимо ввести все параметры планируемого эксперимента (начальную температуру (Start, °C), конечную температуру (Limit, °C), скорость нагрева (Rate), время изотермической выдержки при конечной температуре). В программе предусмотрена возможность пошагового выполнения различных термообработок. Если планируется несколько этапов эксперимента (например, необходимо охладить образец с постоянной скоростью охлаждения), то необходимо ввести параметры этих этапов в соответствующие строчки “No. Step” и поставить галочку на последнем этапе. После этого необходимо зафиксировать введенные условия эксперимента, для чего нажмите кнопку «ОК» (рис. 29).

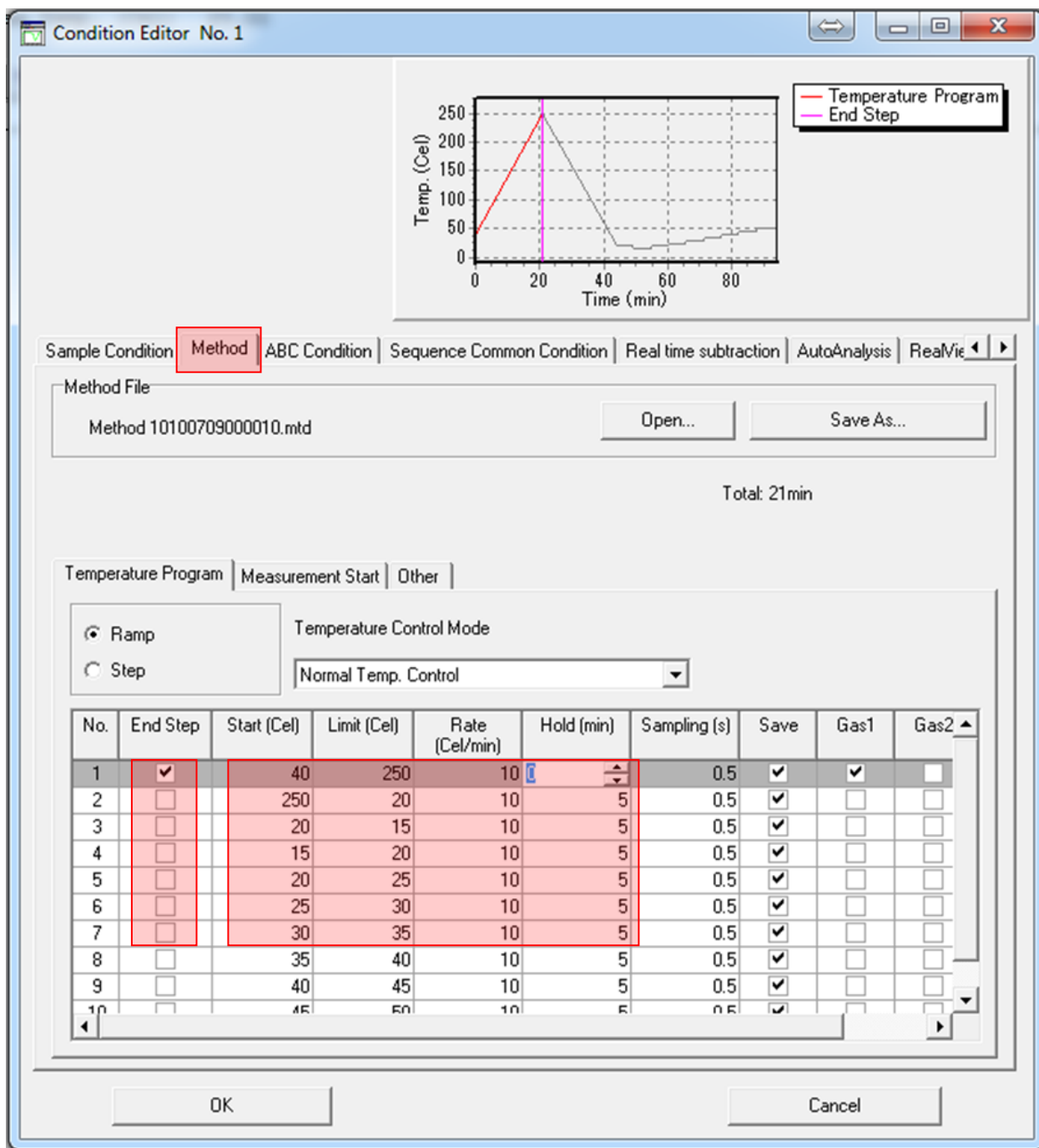


Рис. 29 – Окно программы для ввода параметров эксперимента.

18. Далее необходимо нагреть образец до начальной температуры измерения и дождаться тепловой стабилизации. Для этого нажмите на кнопку «Изотерма» (*Isothermal*) (рис. 30).

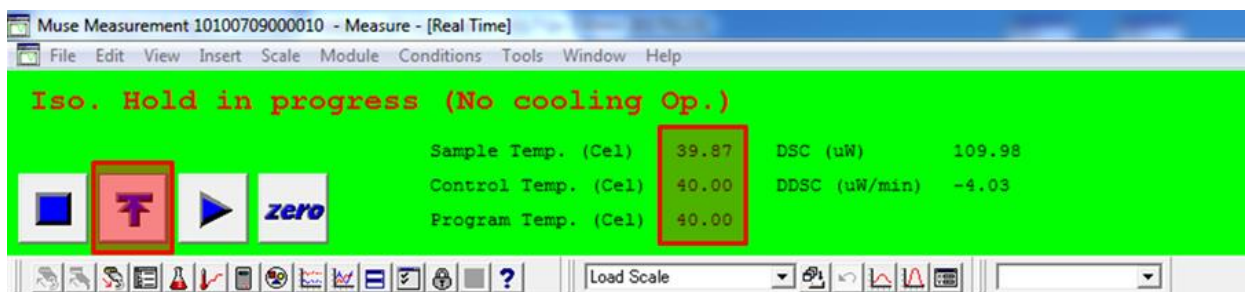


Рис. 30 – Кнопка «Изотерма».

19. Дождавшись, когда значение температуры эталонного образца (Control Temp.) станет равной значению температуры, заданной программой (Program Temp.) (рис. 30), а значение температуры исследуемого образца (Sample Temp.) стабилизируется (не будет изменяться), нажмите на кнопку «Обнуление» (Zero) (рис. 31).

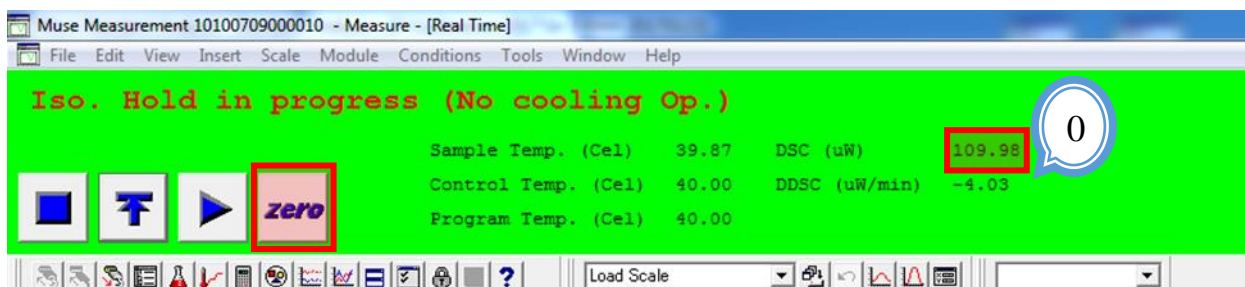


Рис. 31 – Кнопка «Обнуление».

20. Далее нажмите на кнопку «Измерение» (Measurement) (рис. 32), после чего программа начнет выполнять термообработку образца, указанную в редакторе условий эксперимента (пункт 16).

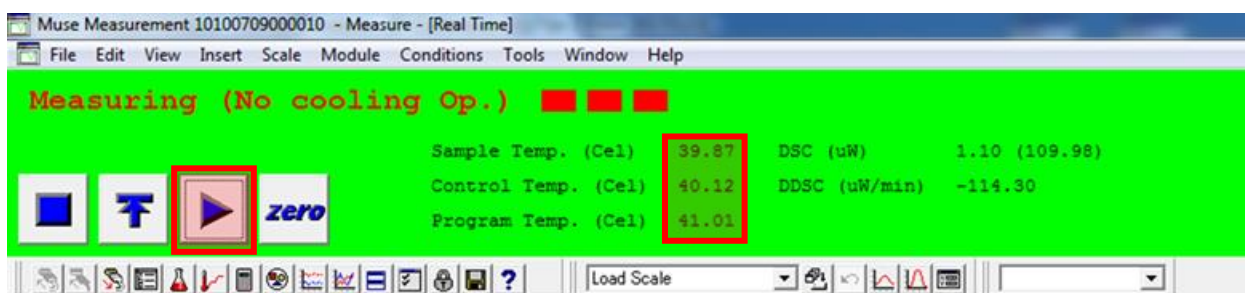


Рис. 32 – Кнопка «Измерение».

21. В процессе эксперимента возможен просмотр текущих результатов в главном окне программы “Measure” в режиме реального времени, а также после завершения эксперимента возможно

просмотреть полный вид экспериментальной кривой теплового потока, нажав на кнопку “*Profile*” (рис. 33).

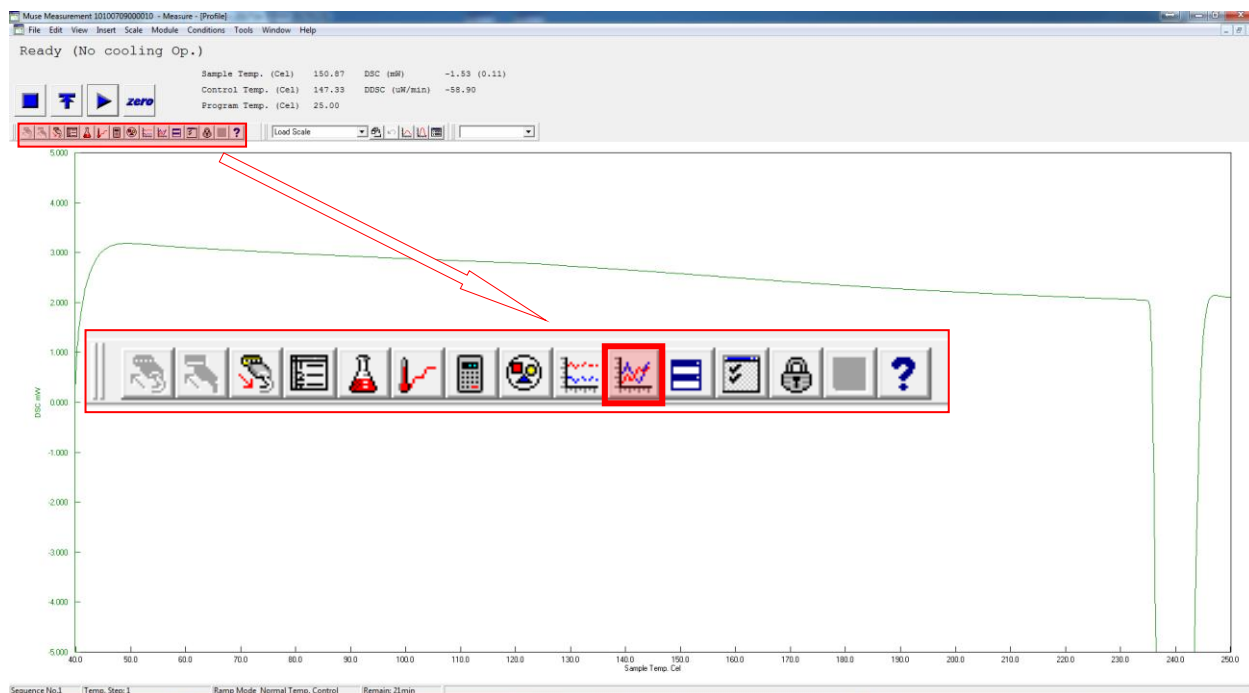
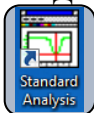


Рис. 33 – Просмотр результатов эксперимента.

22. Для обработки результатов измерений необходимо запустить на рабочем столе программу “Standard Analysis”  и открыть сохраненный файл.

23. После того, как появится кривая ДСК, левой кнопкой мыши кликните по ней, станет доступна кнопка “*Calculate Delta H or DTA Surface Area*”, позволяющая рассчитать площадь пика кривой (рис. 34). Зафиксируйте температуру начала пика, которая характеризует начало процесса, и окончания пика, которые определяются как точки пересечения касательных основной (базовой) линии ДСК и плеч пика. После этого появится значение удельной теплоты этого эффекта.

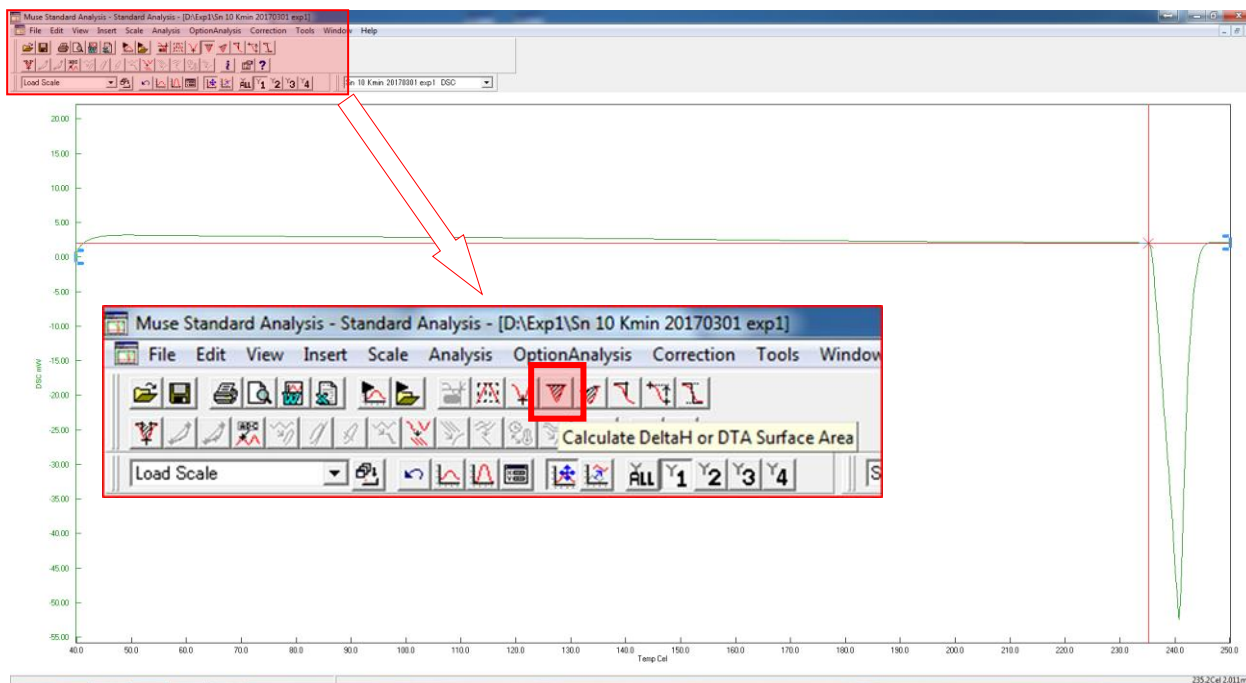


Рис. 34 – Определение удельной теплоты плавления с помощью программы Standard Analysis.

24. Далее можно наблюдать пик плавления в увеличенном масштабе (рис. 35).

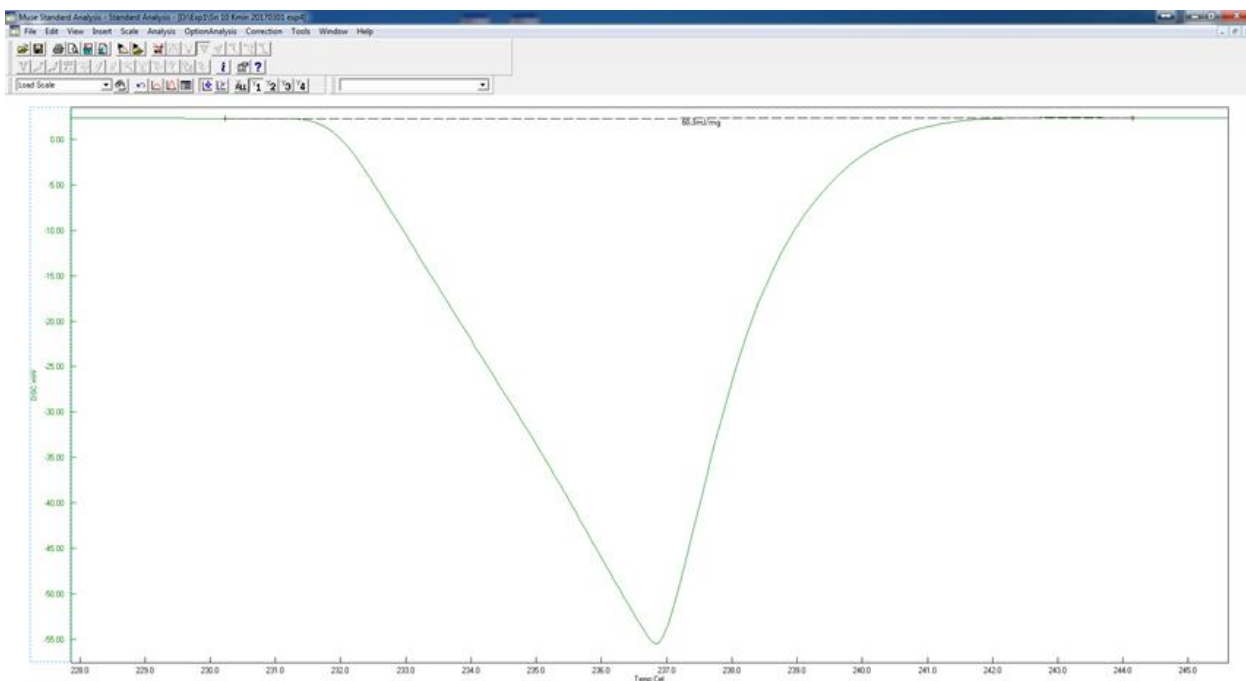


Рис. 35 – Определение удельной теплоты плавления с помощью программы Standard Analysis.

25. Также можно определить температуру плавления образца. Для этого необходимо зафиксировать начало процесса и нажать на кнопку “*Calculate Extrapolation Point*” (рис. 36).

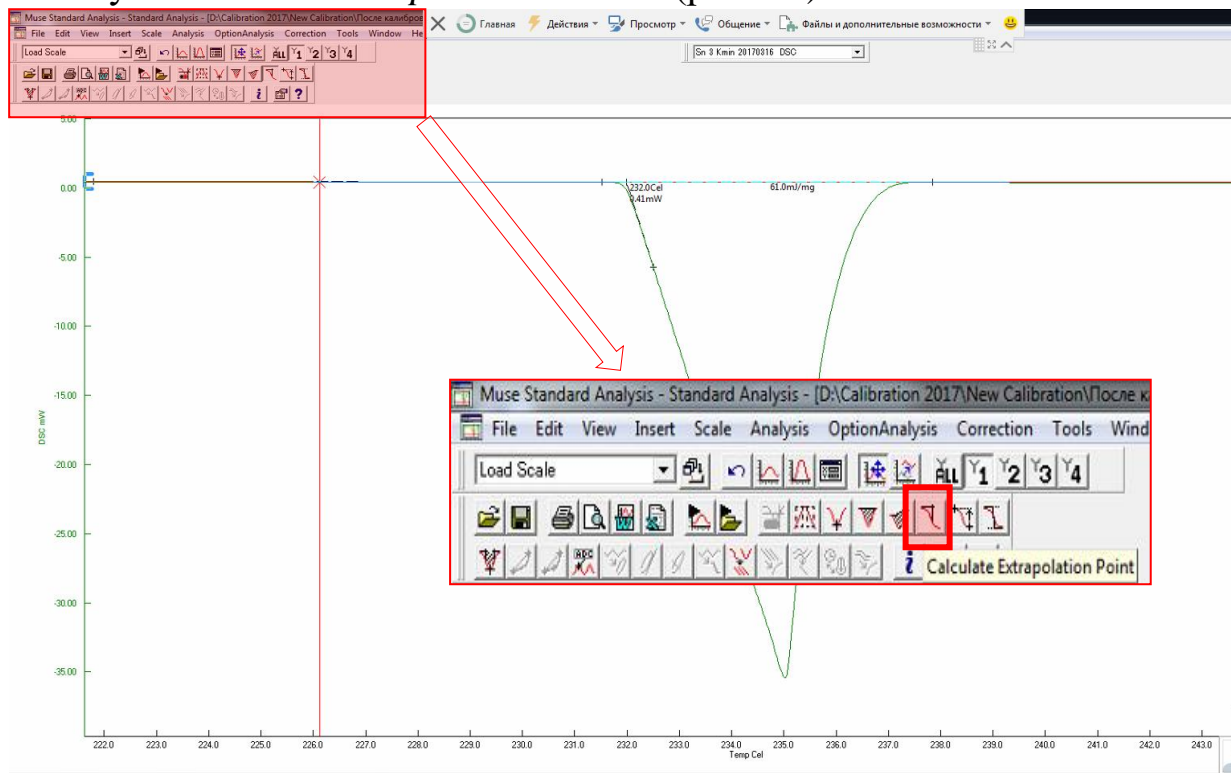


Рис. 36 – Определение температуры плавления с помощью программы Standard Analysis.

26. Перед выключением прибора необходимо дождаться пока температура в измерительной ячейке опустится ниже 40°C. Выключение можно произвести двумя способами:

- нажать на кнопку “Stop” на передней панели прибора;
- закрыть программу, нажав на кнопку в правом верхнем углу окна (для подтверждения завершения работы модуля нажмите «OK» (рис. 37).

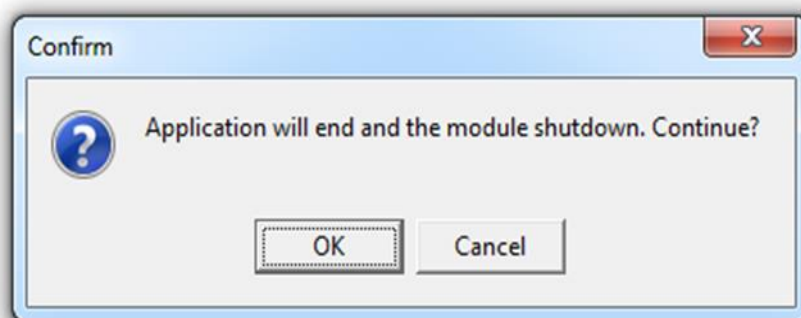


Рис. 37 – Диалоговое окно для завершения работы Seiko DSC 7020 Exstar.

27. После успешного выключения прибора необходимо выключить компьютер, затем выключить источник бесперебойного питания. После этого необходимо отключить от электросети все приборы.

28. Перекройте подачу газа, закрыв вентиль баллона и вентиль ротаметра.

Варианты заданий для самостоятельной работы

1. Выполните аналогичные измерения для кристалла индия, указав при этом скорость нагрева 30 К/мин, предельную температуру 180°C. Определите молярную теплоту и температуру плавления индия из полученной экспериментальной зависимости теплового потока.

2. Исследуйте плавление кристалла свинца со скоростями нагрева 20 К/мин и 40 К/мин (установите значение конечной температуры измерения 370°C). Используя полученные кривые ДСК, определите удельную теплоту плавления и температуры плавления. Сравните полученные результаты для различных скоростей, а также сравните эти значения с литературными.

3. Выполните измерения теплового потока для кристалла индия в режиме изохронного нагрева со скоростью 20 К/мин с последующим охлаждением со скоростью 10 К/мин до комнатной температуры.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о приборе Seiko DSC 7020 Exstar. Опишите устройство и принцип работы этого прибора.

2. Что подразумевает под собой термин «дифференциальный»?

3. Опишите порядок выполнения настоящей лабораторной работы.

4. Дайте определение понятиям плавление и кристаллизация. Как идентифицировать эти явления на термограммах ДСК.

5. Дайте определение понятию фазового перехода I рода, приведите примеры.

6. Дайте определение понятию фазового перехода II рода, приведите примеры.

7. Какие тепловые эффекты можно наблюдать с помощью ДСК?
8. Как определить значение поглощающейся / выделяющейся теплоты из экспериментальных термограмм ДСК?
9. Назовите основные компоненты для проведения эксперимента.
10. Охарактеризуйте этапы выполнения лабораторной работы.
11. Что такое удельная теплота плавления? Как определить ее значение?

Список литературы

1. Кирьянов К.В. Калориметрические методы исследования. / К.В. Кирьянов. — Нижний Новгород : ННГУ, 2007. — 76 с.
2. Агеев Е.П. Практикум по физической химии. Термодинамика. / Е.П. Агеев, В.В. Лунин. — Москва : Академия, 2010. — 224 с.
3. Харитонова Е.П. Основы дифференциальной сканирующей калориметрии. / Е.П. Харитонова. — Москва : МГУ им. Ломоносова, 2010. — 17 с.
4. Паниковский Т.Л. Об использовании дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования структурных особенностей органических и неорганических соединений. / Т.Л. Паниковский, С.Н. Бритвин. — Санкт-Петербург : СПбГУ, 2013. — 4 с.
5. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. / А.Л. Емелина. - Москва : МГУ, 2009. - 42 с.
6. Майорова А.Ф. Термоаналитические методы исследования // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — №10 : Т. 1. — С. 50-54.
7. Свиридова Т.В. Химия твердого тела: топохимическая кинетика. / Т.В. Свиридова. — Минск : БГУ, 2011. — 23 с.
8. Кобелев Н.П. Тепловые и упругие эффекты при кристаллизации металлического стекла $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ / Н.П. Кобелев, В.А. Хоник, Г.В. Афонин // Физика твердого тела. — 2015. — №9 : Т. 57. — С. 1675-1678.
9. Савельев И.В. Курс общей физики. / И. В. Савельев. — Москва : Наука, 1970. — Т. 1 : С. 494.
10. Ruben S. Handbook of the elements. / S.Ruben. — La Salle IL : Open Court Publishing Co., 1985. — 110 p.

11. Yaws C.L. Handbook of properties of the chemical elements. / Carl L. Yaws. — Beaumont : Lamar University, 2011. — 503 p.
12. American Elements in a U.S. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.americanelements.com.
13. Afonin G.V. Universal relationship between crystallization-induced changes of the shear modulus and heat release in metallic glasses / G.V. Afonin, Y.P. Mitrofanov, A.S. Makarov, N.P. Kobelev, W.H. Wang, V.A. Khonik // Acta Materialia. — 2016. — Vol.115.—P.204-209.

Научно-исследовательская работа №2 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

Цель работы:

– изучить особенности явления ползучести при линейном нагреве.

Приборы и принадлежности:

- экспериментальная установка для измерения относительного удлинения,
- образцы металлических стекол.

Теоретическая часть

Под действием приложенной нагрузки или механического напряжения, твердые тела (кристаллические и аморфные) с течением времени медленно деформируются, т. е. меняют форму и размеры. Такое явление называется "ползучесть" или "вязкоупругость".

Для того, чтобы охарактеризовать деформацию образца, необходимо взять относительное удлинение его длины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где $\Delta l = l - l_0$, l_0 – исходный размер образца, l – длина после механического напряжения.

В деформации МС выделяют следующие составляющие:

- идеальная упругость (обратимая, мгновенная, связь напряжение–деформация линейная);
- неупругость (обратимая, зависящая от времени, связь напряжение–деформация линейна);
- вязкоупругость (зависящая от времени, связь напряжение–деформация линейна);
- мгновенная пластичность.

Гомогенное течение металлических стекол при не высоких деформациях и скоростях нагрева является примером ползучести, и именно поэтому вязкоупругость представляет научный и практический интерес.

Представить линейную вязкоупругость возможно с помощью реологических моделей. Состоят они из:

- пружины с модулем упругости E . В данном случае растягивающее напряжение σ взаимосвязано с относительной деформацией ε выражением $\sigma = E\varepsilon$;
- ньютоновского демпфера с коэффициентом вязкости η . Для случая с демпфером скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ взаимосвязана с напряжением σ и имеет вид: $\sigma = \eta\dot{\varepsilon}$.

Модель Максвелла включает в себя соединение пружины и ньютоновского демпфера — последовательно, а модель Фойгта — параллельно (см. рис. 1). Такое представление возможно для простейшего случая с вязкоупругим телом.

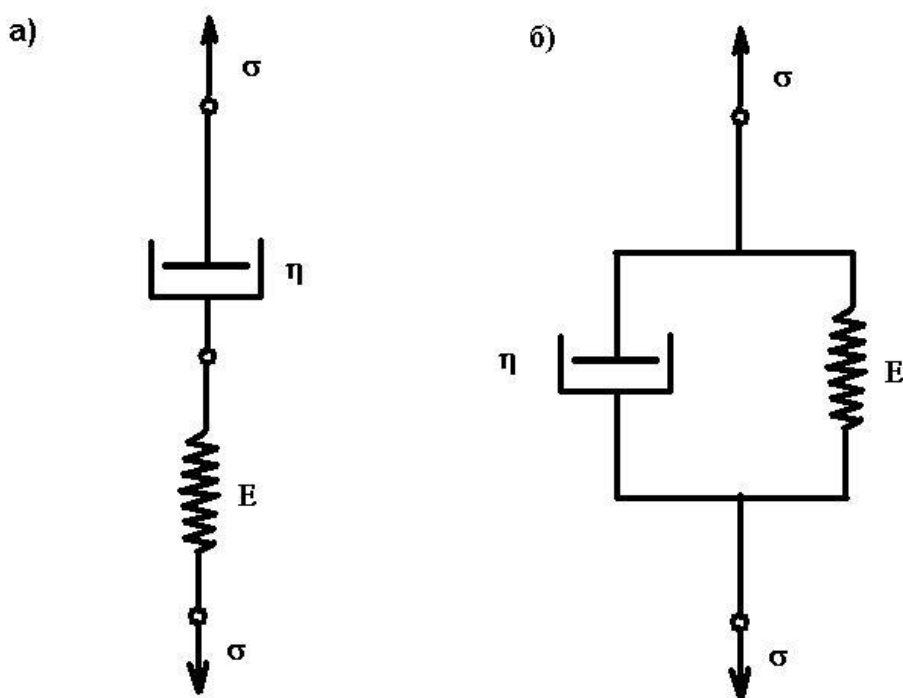


Рис.1 – Реологические модели вязкоупругого тела: а) Максвелла, б) Фойгта.

Благодаря многочисленным исследованиям, было выявлено, что с помощью Максвелловской модели можно описать гомогенное (однородное) пластическое течение металлических стекол при не больших деформациях и скоростях нагрева.

Важно отметить, что такой механический вид, как ползучесть является информативной и простой. Деформация образца происходит при приложении постоянного напряжения. Ползучесть металлических стекол исследована крайне мало, несмотря на ее идеологическую

простоту, а все потому, что реализация эксперимента весьма сложна, из-за того, что измерение деформации образца зачастую сравнимы с паразитными тепловыми деформациями конструктивных элементов экспериментальной установки. Далее рассмотрены наиболее известные экспериментальные результаты и их интерпретация.

При изотермических испытаниях достоверным фактом является линейный рост вязкости со временем металлических стекол. Согласно модели структурной релаксации зависимость изотермической ползучести от времени подчиняется следующему закону

$$\varepsilon(t) = B \ln\left(\frac{t}{t_a}\right),$$

где $B = \sigma k T N_0 \Omega C$, t – время испытания, t_a – время предварительной термообработки. Таким образом, при больших временах зависимости $\varepsilon = \ln(t)$ должны спрямляться, а экстраполяция линейных участков этих зависимостей на нулевую деформацию будет определять время предварительного отжига.

Логарифмическая зависимость изотермической ползучести от времени для случая когда время предварительной термообработки равно 3600 с показаны на рисунке 2. Заметно, что кривые ползучести спрямляются при $t > 5 \times 10^4$, а их асимптоты отсекают на оси абсцисс время ≈ 2000 с, что сопоставимо по порядку величины с временем предварительного отжига.

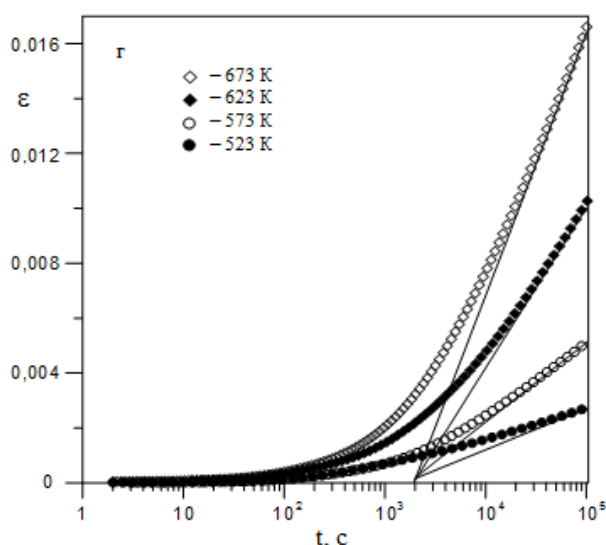


Рис.2 – Кривые зависимости изотермической ползучести металлического стекла $\text{Co}_{57}\text{Fe}_5\text{Ni}_{10}\text{Si}_{11}\text{B}_{17}$ от логарифма времени для предварительного отжига в 3600с.

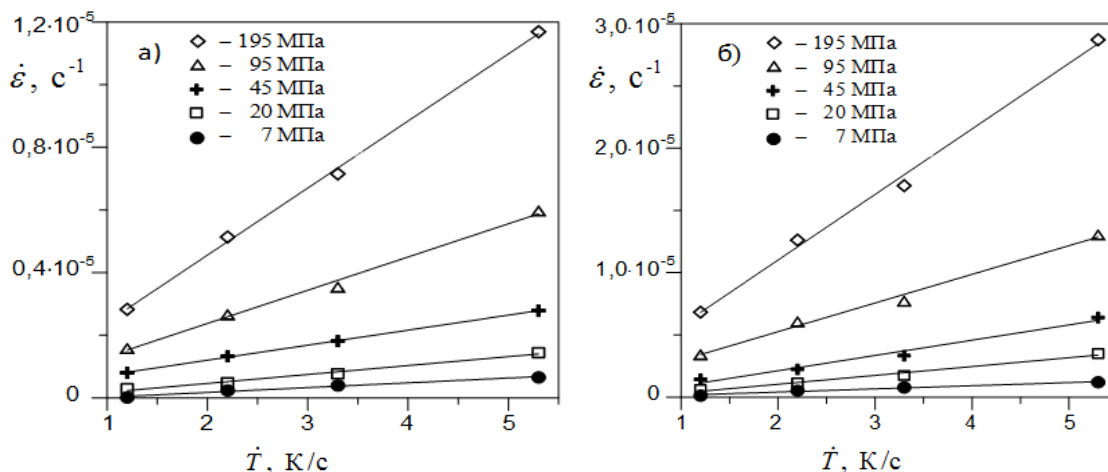


Рис.3 – Линейный рост зависимостей скорости ползучести металлического стекла $\text{Co}_{57}\text{Fe}_5\text{Ni}_{10}\text{Si}_{11}\text{B}_{17}$ от скорости нагрева при $T = 623 \text{ K}$ (а) и 673 K (б) при различных напряжениях σ .

Описание лабораторной установки

В работе использовалась оригинальная экспериментальная установка для измерения ползучести.

Устройство установки можно логически разделить на отдельные части, такие как экспериментальная установка для измерения деформации растягивающих напряжений (см. рис. 4) и обслуживающий ее программно-аппаратный комплекс (см. рис. 5).

Установка имеет следующие технические параметры:

- диапазон механических напряжений: 5-200 МПа,
- температурный диапазон: 20-700 С,
- чувствительность датчика деформации: 0.01 мкм,
- скорость изменения температуры: 0.1-20 С/мин.

Линейный четырехобмоточный дифференциальный трансформатор фирмы «Sentech Inc.» LVDT 813-00-100 используется в качестве датчика перемещения (см. рис. 2.5). Позиционный датчик обслуживается с помощью контроллера EL-35 LVDT Signal Conditioner производства предприятия «SINGER INSTRUMENTS».

Терморегулирование реализовано по принципу ПИД – регулирования. Термопара, закрепленная вблизи образца используется как датчик температуры. Сигнал с термопары передается на вход специализированного усилителя, который создан на базе микросхемы AD595CD, после оцифровывается мультиметром Keithley Integra 2700. На основе данных, которые получены от мультиметра, приложение, специально написанное в среде программирования Delphi, преобразует считанное напряжение в температуру и сравнивает полученную величину температуры с

датчиком температуры, затем рассчитывает ПИД-коэффициенты и подает управляющее напряжение для силового блока посредством цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

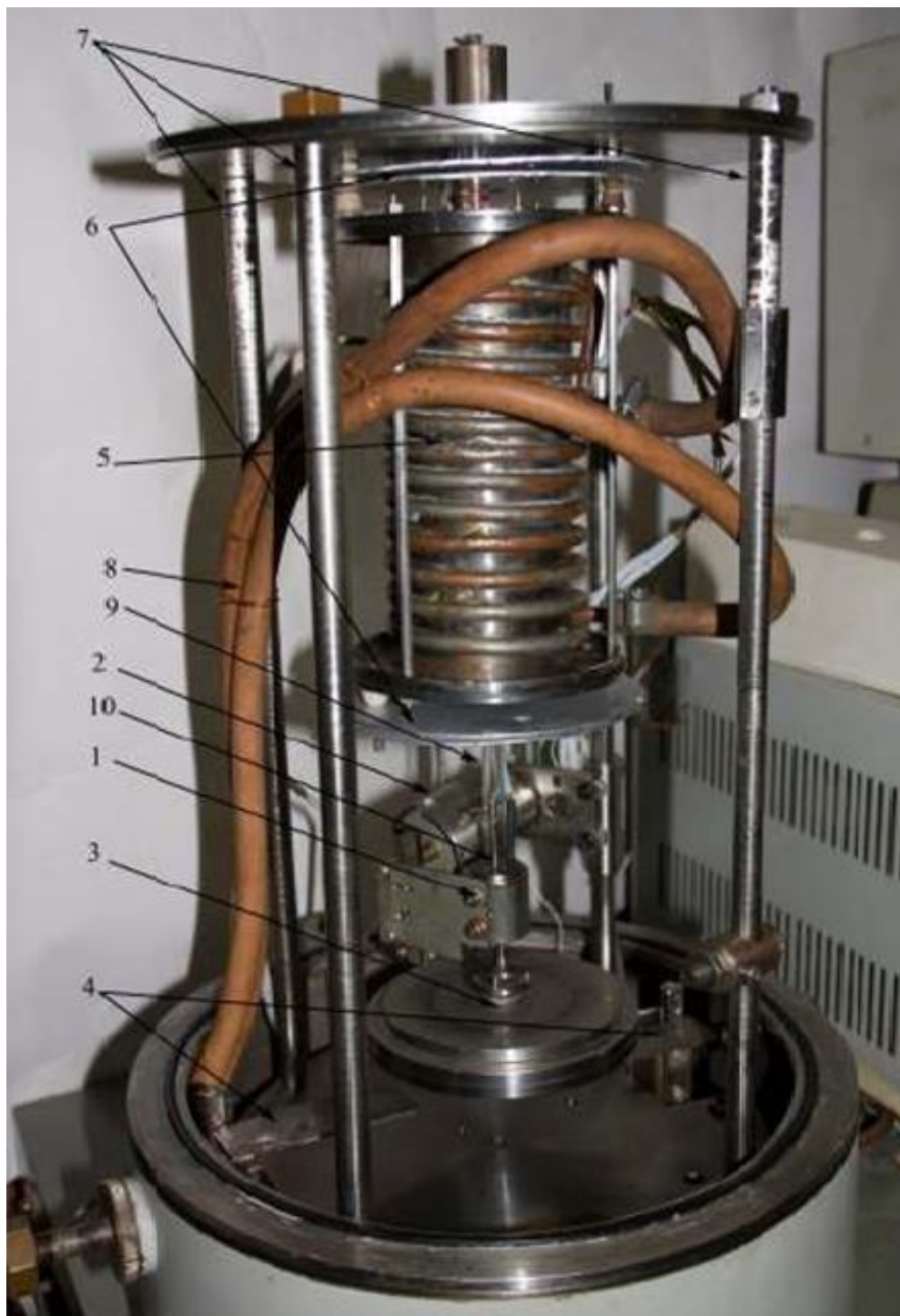


Рис. 4 – Установка для измерения ползучести. 1 – позиционный датчик (дифференциальный трансформатор), 2 – сервопривод, 3 – грузы, 4 – механизм контроля наличия механического напряжения, 5 – печь, 6 – тепловые отражатели, 7 – инварные стойки, 8 – патрубки охлаждения, 9 – нижняя кварцевая штанга, 10 – сердечник дифференциального трансформатора.

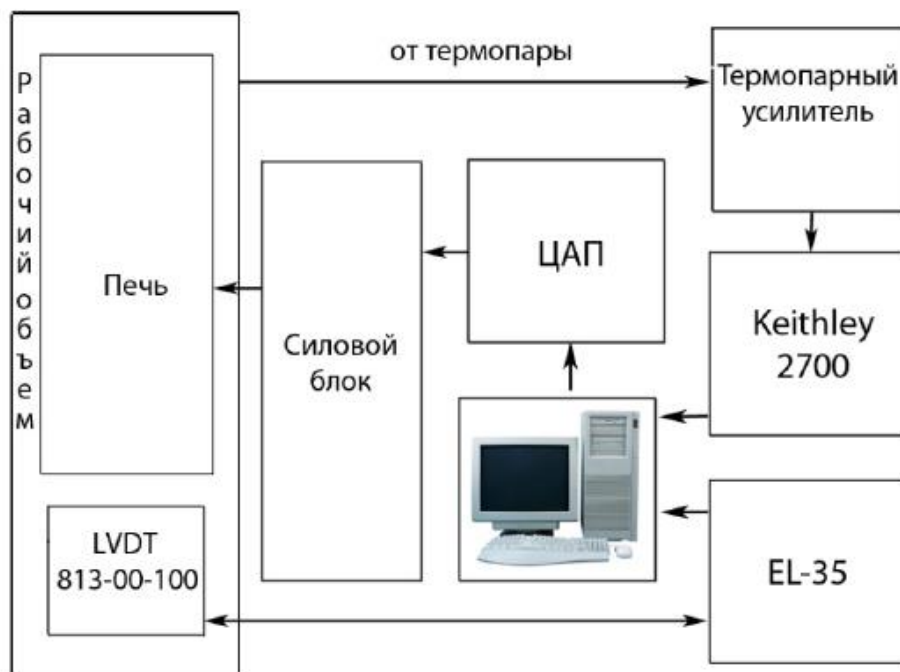


Рис. 5 – Схема аппаратно-программной части установки.

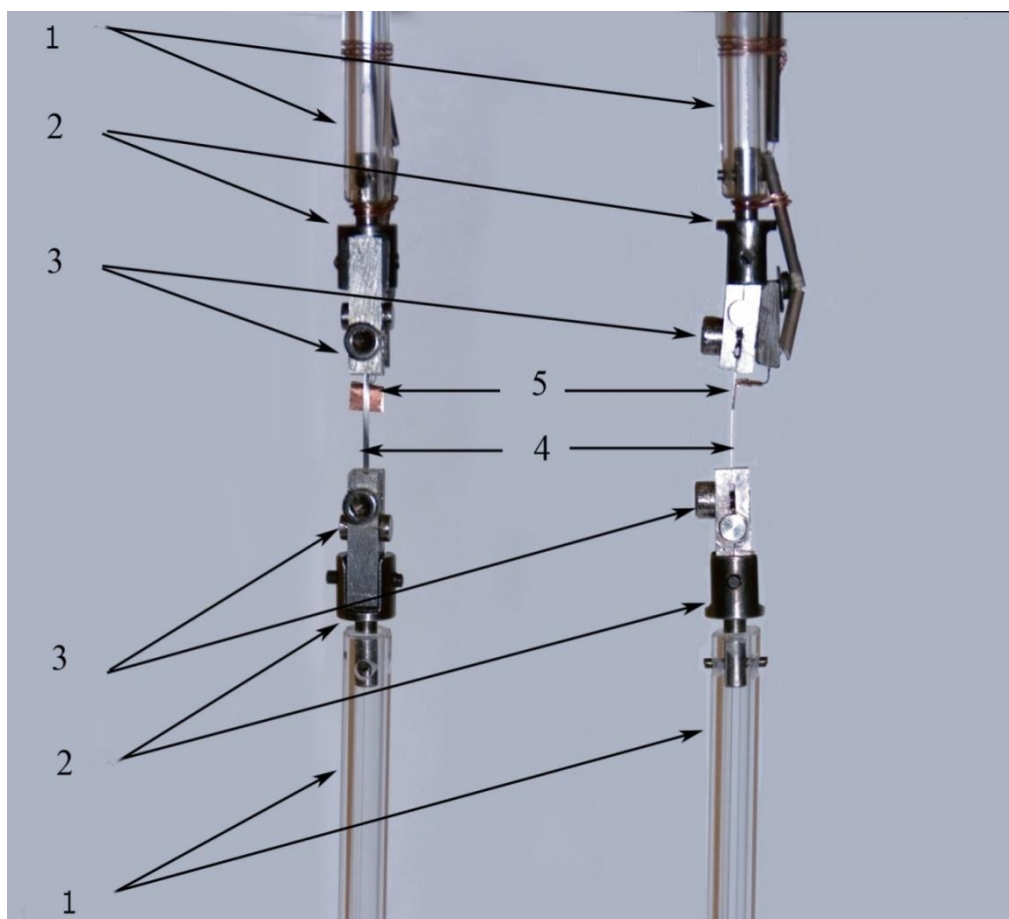


Рис. 6 – 1 – кварцевые штанги, 2 – стыковочные элементы, осуществляющие связь между кварцевыми штангами и зажимами, 3 – зажимы, 4 – образец, 5 – термопара

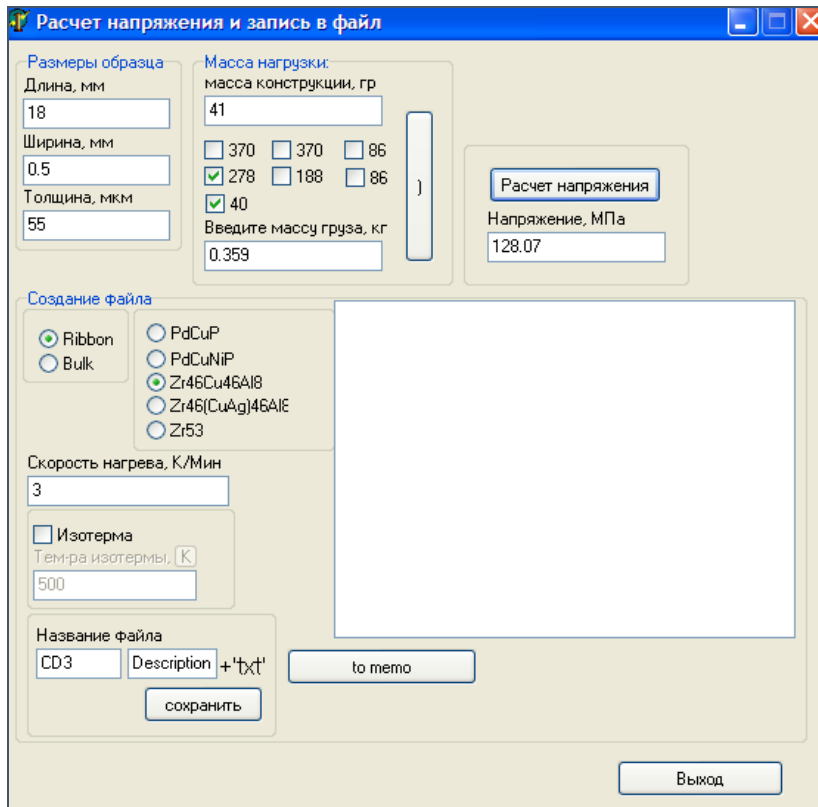
Для предотвращения окисления зажимов 3 (рис. 2.6) и образца 4 при высоких температурах, деформационная машина помещена в рабочем объеме вакуумного универсального поста ВУП–5, который позволяет создавать остаточное давления до $\approx 10^{-3} \text{ Па}$. Для того, чтобы снизить нагрев позиционного датчика и сервопривода осуществлено проточное водяное охлаждение кожуха молибденовой печи 5 и установлена система отражателей с ее нижнего торца 6.

За счет того, что используются инварные стойки 7 (см. рис. 4) и кварцевые штанги 1 (см. рис. 6.), влияние паразитного теплового расширения на измерения ползучести в значительной степени ослаблено.

Выполнение работы

1. Измерьте длину, ширину и толщину образца.
2. Зафиксируйте образец в зажимах 3 (см. рис. 6).
3. Закрепите на образце термопару 5 на верхнем зажиме непосредственно вблизи образца (см. рис. 6).
4. Соедините зажимы с кварцевыми штангами 1 при помощи стыковочных элементов 2 (см. рис. 6).
5. Поместите в рабочую область печи растягивающий механизм в который входят: зажимы, образец, штанги и прикрепленная к ним термопара.
6. К нижней тяге прикрепите сердечник дифференциального трансформатора 10 и площадку с грузами 3 (см. рис 4).
7. Перед началом нагрева установите дифференциальный трансформатор в нулевое положение при помощи сервопривода 2 (см. рис 4).
8. Включите установку.
9. С помощью программы *Stresses.exe* (см. рис. 7) рассчитайте напряжение, для этого внесите значения длины, ширины, толщины образца и массу нагрузки, в соответствующие поля. Для создания файла, необходимо указать тип и вид стекла, скорость нагрева, нажать кнопку *to memo* и сохранить.

а)



б)

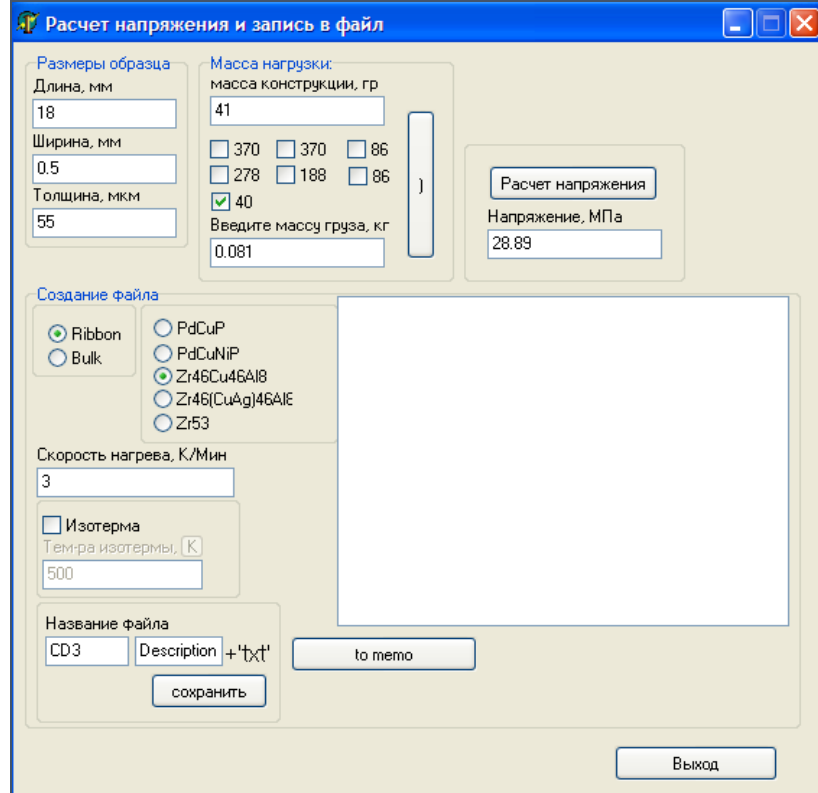


Рис. 7 – Меню программы для расчета напряжения (а. большое напряжение, б. маленькое напряжение) и записи в файл.

10. Запустите программу *EL-35* (рис. 8), чтобы включить режим измерений. *Single* - одно измерение, *Sequential* - несколько измерений.

В результате измерений, получим кривую относительного удлинения. Для сохранения данных нажмите кнопку *Save list*.

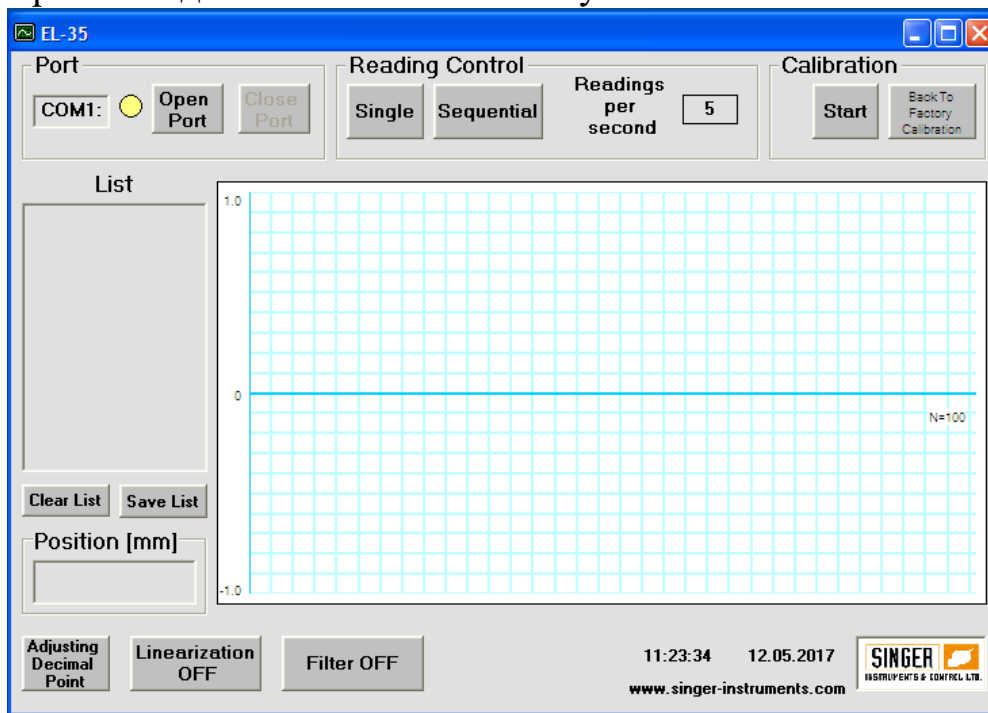


Рис.8 – Меню программы для запуска режима измерений.

11. Откройте программу *CreepThermo.exe* (рис. 9), затем вкладку параметры нагрева, в начальных параметрах укажите температуру и скорость нагрева. Далее нажмите кнопку "Нагрев".

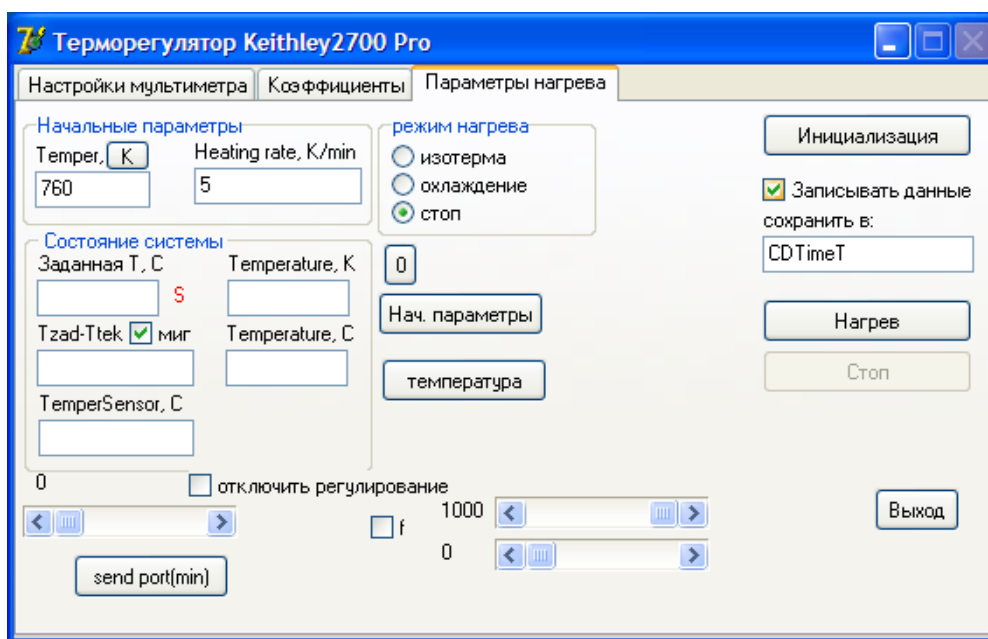


Рис. 9 – Меню программы для нагрева. Измерения осуществляются с помощью мультиметра Keithley Integra 2700.

12. С помощью программы *PO Visc 1.08* откройте файлы *Data*, *CDTime* и *Description*.

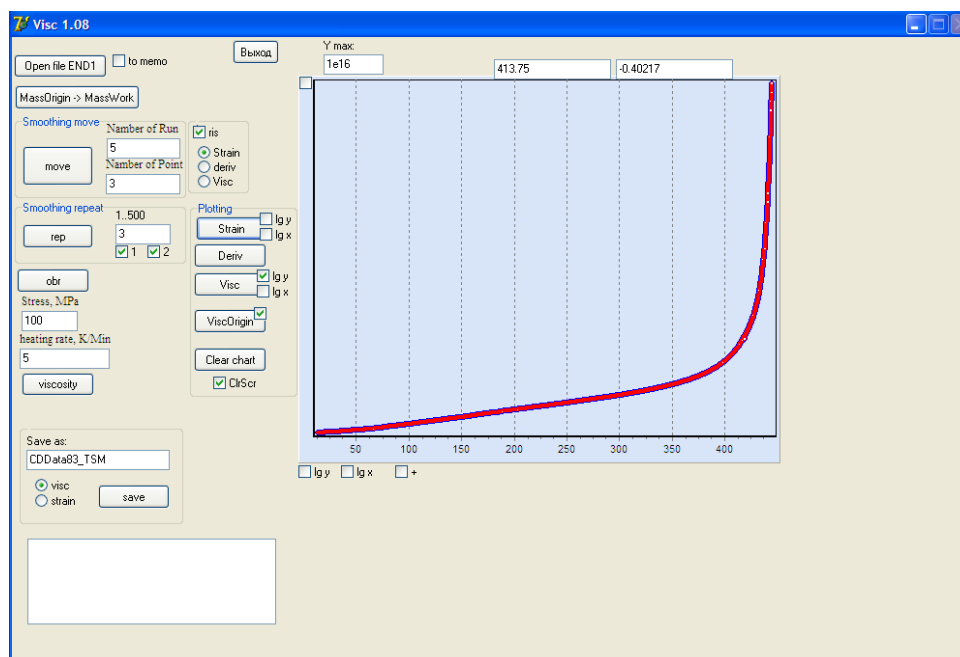


Рис. 10 – Меню программы PO Visc 1.08.

Обработка результатов

1. Запустите программу *Convert*, предназначенную для сшивки файлов. Откройте файлы с данными нагрева, деформации и описания. Далее нажмите кнопку *1* → *divide* → *leng* → *сшить по времени* → *stresses* → *save and exit*.

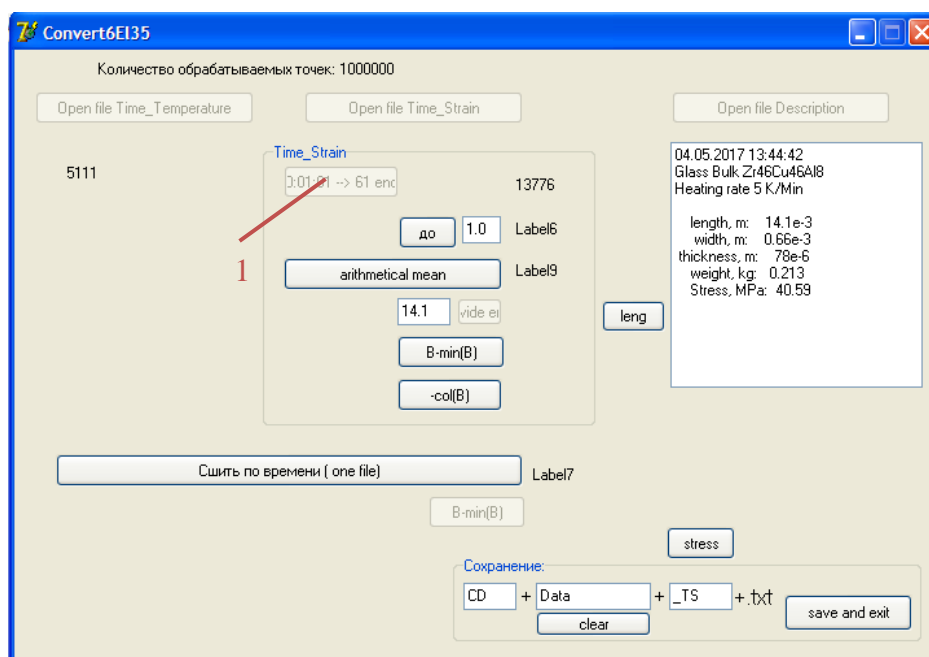


Рис. 11 – Меню программы для сшивки файлов.

2. Полученный файл после сшивки переместите в папку обработанные данные.
3. Полученный файл импортируйте в любую поддерживающую таблицы программу.
4. Постройте графики зависимости относительного удлинения образца от температуры.

Примеры измерений

Измерена изохронная ползучесть металлического стекла $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ в массивном и ленточном состояниях при различных температурах (в интервале от T до $T_g + 40$ К, где T – комнатная температура, T_g – температура стеклования) и скоростях нагрева (0.33–20 К/мин). Зависимости сдвиговой вязкости η от температуры T были рассчитаны по полученным кривым деформация-температура. Полученные зависимости сдвиговой вязкости η от температуры T для скоростей нагрева 0.33, 1.5, 20 К/мин исследуемого металлического стекла $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ показаны на рис. 11 (а. массивный образец и б. ленточный образец). Показаны также литературные данные по квазиравновесной вязкости стекол $\text{Pd}_{77.5}\text{Cu}_6\text{Si}_{16.5}$ и $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$, так как они близкие по составу с исследуемым металлическим стеклом. Линия, которая показана на рис. 12 является линейным приближением литературных данных по квазиравновесной вязкости (темные прямоугольники и треугольники, показанные на рисунке 12).

Измерения ползучести проводились на напряжениях 30 и 110 МПа. Измерения при напряжении 30 МПа показывали низкую точность при небольших температурах $300 \text{ К} < T < 400 \text{ К}$. Измерения при напряжении 110 МПа показывали удовлетворительную точность при таких же температурах, но в результате стремительного роста температуры и деформации не возможно зайти заметно выше. В промежутке температур $450 \text{ К} < T < T_g$ результаты измерений на данных напряжениях были одинаковы. Проанализировав эксперимент ползучести для массивных и ленточных металлических стекол в изохронном режиме, можно выделить закономерности.

- При температурном интервале от 350 К до $T_g + 30$ К сдвиговая вязкость η уменьшается в зависимости от скорости нагрева на 6 – 7 порядков, от $\approx 10^{15} \text{ Па} \times \text{с}$ до $\approx 10^9 \text{ Па} \times \text{с}$.

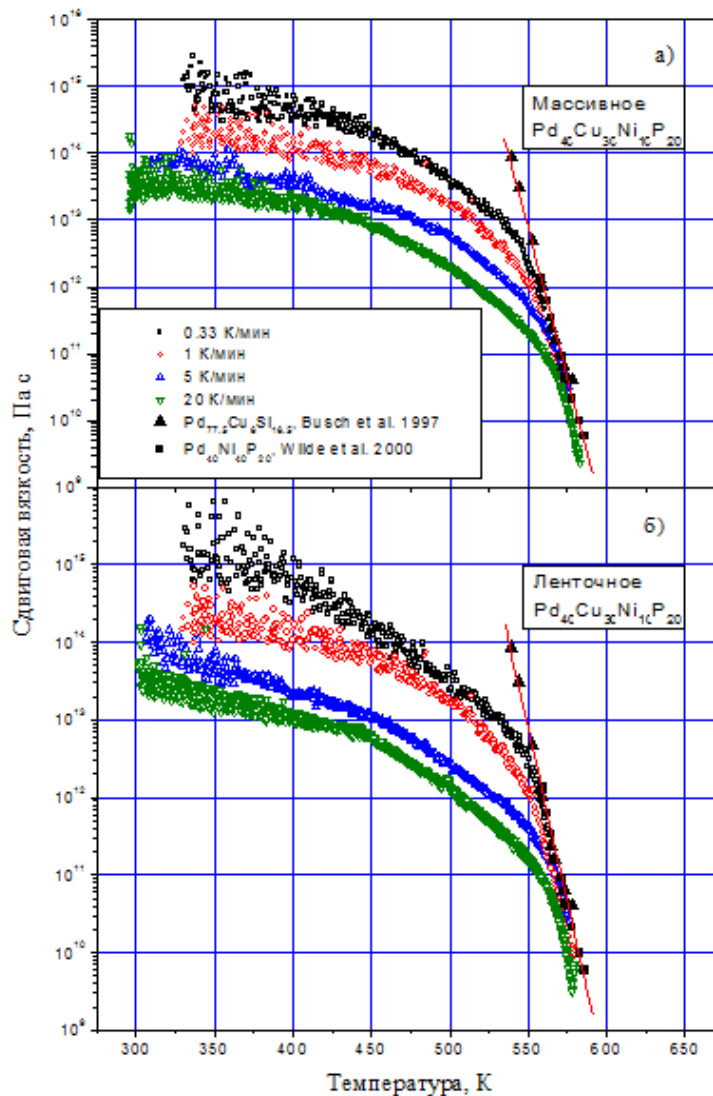


Рис. 12 – Зависимость сдвиговой вязкости массивного(а) и ленточного(б) металлического стекла $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ с различными скоростями нагрева.

- При температуре меньше температуры стеклования сдвиговая вязкость зависит от скорости нагрева. При увеличении скорости нагрева в 15 раз сдвиговая вязкость понижается почти на 1,5 порядка.
- При температуре выше температуры стеклования η не зависит от скорости нагрева – температурные зависимости η для всех скоростей нагрева выходят на линию квазиравновесной вязкости.
- Проанализировав все зависимости сдвиговой вязкости от температуры можно сказать, что почти во всех случаях η массивных и ленточных образцов одинаковы. Тем не менее, в некоторых случаях η ленточных образцов бывает несколько ниже или выше η массивных образцов. Такое отличие возможно в случае не правильного определения поперечного сечения образцов и их рабочей длины.

Контрольные вопросы

1. Что такое ползучесть?
2. Опишите модели Максвелла и Фойгта.
3. Какие составляющие деформации выделяют?
4. Основные элементы измерительного комплекса.
5. Какие технические параметры имеет установка?
6. Основные закономерности изохронной ползучести металлических стекол.

Список литературы

1. Лысенко А.В. Структурная релаксация и гомогенное пластическое течение металлических стекол на основе Pd и Zr // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — 2010. — Воронеж.
2. Афонин Г.В. Релаксация упругих и вязкоупругих свойств, обусловленная структурной релаксацией объемных металлических стекол систем Zr-(Cu,Ag)-Al и Pd-Cu-Ni-P // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — 2012. — Воронеж.
3. Afonin G.V. Structural relaxation and related viscous flow of Zr-Cu-Al-based bulk glasses produced from the melts with different glass-forming ability / G.V. Afonin, S.V. Khonik, R.A. Konchakov, Yu.P. Mitrofanov, N.P. Kobelev, K.M. Podurets, A.N. Tsyplakov, L.D. Kaverin, V.A. Khonik // *Intermetallics*. — 2011. — Vol.19. – P. 1298–1305.
4. Ляхов С.А. Кинетика ползучести металлического стекла Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀ // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — 2007. — Воронеж.
5. Чах К. Обратимая вязкоупругая деформация массивного металлического стекла / К. Чах, С. А. Ляхов, В.А. Хоник // Деформация и разрушение материалов. — 2006. — В. 8. – С. 22–25.
6. Берлев А.Е. Ползучесть массивного металлического стекла Zn_{52,5}Ti₅Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al₁₀ / А.Е. Берлев, М. Ота, В.А. Хоник // Вестник ТГУ. — 2003. — Т. 8, В. 4. – С. 522–524.
7. Bobrov O.P. The recovery of structural relaxation-induced viscoelastic creep strain in bulk and ribbon Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀ glass / O.P. Bobrov, K. Csach, S. V. Khonik, K. Kitagawa, S.A. Lyakhov, M. Yu. Yazvitsky, V.A. Khonik // *Scripta materialia*. — 2007. — Vol.56. – P. 29 - 32.

Научно-исследовательская работа № 3 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы:

– определение параметров электрических релаксационных колебаний при электрическом разряде неоновой лампы.

Приборы и принадлежности:

- источник тока ВУП-2;
- осциллограф С1-73;
- миллиамперметр;
- вольтметр;
- неоновая лампа;
- конденсатор (2 шт.);
- переменный резистор;
- соединительные провода.

Теоретическая часть

В данной лабораторной работе реализуется экспериментальное исследование релаксационных электрических колебаний, с помощью электрической RC-цепи с неоновой лампой (рис. 1). При этом выполняется измерение параметров релаксационных колебаний.

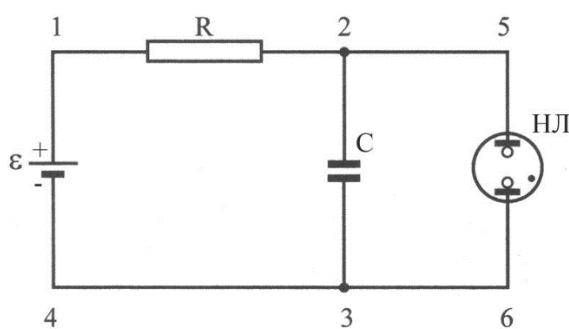


Рис. 1 – Схема электрической RC-цепи с неоновой лампой.

Релаксация – это процесс восстановления (или перехода) системы в равновесное состояние после некоторого возмущения (внешнего воздействия), который описывается экспоненциальным законом: $g = g_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ или $g = g_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, где g – некоторая физическая вели-

чина, а g_0 – её равновесное значение. Первое выражение описывает самопроизвольный процесс возвращения системы в положение равновесия, например, разряд конденсатора через сопротивление. Второе выражение описывает вынужденный переход системы в новое равновесное состояние, например, зарядки конденсатора от источника. Величина τ называется временем релаксации – это время, в течение которого остаточное возмущение в e раз меньше исходного. Действительно, при $t = \tau$ для первого выражения $\frac{g}{g_0} = \frac{1}{e}$, а для второго

$$\frac{g_0 - g}{g_0} = \frac{1}{e}.$$

В сложных неоднородных системах в процесс релаксации вовлекаются различные микроструктуры, обладающие разными временами релаксации, и усреднённый процесс релаксации происходит по более сложному закону. В этом случае говорят о распределении по спектру времён релаксации, а характерное время определяют как среднее по этому распределению. Однако такой формальный подход весьма неудобен для описания свойств системы.

Еще в середине XIX века Кольрауш подметил удивительный факт – неэкспоненциальная релаксация в сложных хаотически неоднородных системах очень хорошо описывается так называемой растянутой экспонентой (функцией Кольрауша–Вильсона): $g = g_0 e^{-(t\tau)^\beta}$, где β – показатель степенной зависимости.

В каких случаях возникает неэкспоненциальная релаксация и что означает релаксация по растянутой экспоненте? Отметим формальный момент. Экспоненциальная релаксация соответствует постоянному темпу релаксации $w(t) = 1/\tau$ (темп релаксации определяется уравнением $dg/dt = -w(t)g$), а если темп релаксации зависит от времени, то возникает спектр времен релаксации. Растянутая экспонента соответствует степенному убыванию темпа релаксации: $w(t) \sim t^{-(1-\beta)}$. Замедление темпа релаксации означает, что с течением времени определяющая роль переходит от подсистем с быстрой релаксацией к подсистемам с медленной релаксацией. Если темп релаксации связан с пространственными размерами подсистемы, то неэкспоненциальная

релаксация происходит в системе, обладающей релаксирующими подсистемами различного масштаба.

Различные авторы получали растянутую экспоненту исходя из различных подходов. Растянутая экспонента естественным образом возникает в системах со случайной пространственной неоднородностью. Еще в 1949 году Форстер (Т. Forster) получил такой закон для релаксации случайно распределенных по пространству неподвижных экситонов, вероятность взаимного гашения которых степенным образом зависит от расстояния между ними. В такой системе первыми исчезают экситоны, расположенные близко друг к другу, а на больших временах остаются только экситоны, изначально расположенные далеко от своих соседей (хотя таких экситонов мало, но живут они долго). Таким образом, возникает последовательное вовлечение в игру все больших пространственных масштабов.

Растянутая экспонента возникает также в моделях со случайными блужданиями, где релаксация наступает при контактной встрече дефектов и возбуждений. В моделях такого рода также важную роль играет пространственная случайная неоднородность в расположении частиц.

Для объяснения неэкспоненциальной релаксации может играть важную роль также иерархическая взаимосвязь различных процессов. Процессы более высокого уровня вступают в игру только после того, как произошли процессы более низких уровней, которые накладывали на них запрещающие ограничения. В таких моделях также возникает релаксация по растянутой экспоненте.

В различных системах процесс релаксации может определяться различными причинами. Можно также ожидать одновременного действия различных механизмов.

Электрические релаксационные колебания состоят из двух процессов: процесса зарядки конденсатора (вынужденный процесс) и процесса его разрядки через сопротивление (самостоятельный процесс). Колебания подобного вида очень отличаются по своей форме от гармонических колебаний и называются релаксационными (или срывными). Таким образом, релаксационные колебания – это незатухающие негармонические колебания нелинейных систем, для которых характерно накопление и сброс энергии (с англ. слово *relaxation* озна-

чает «ослабление»). Генератором таких колебаний может служить неоновая лампа, включённая в электрическую RC-цепь параллельно конденсатору (см. рис. 1).

Одной из основных частей рассматриваемой схемы является газоразрядная (неоновая) лампа, состоящая из стеклянного баллона с двумя герметично впаянными электродами в виде дисков или цилиндров разного диаметра. Баллон заполнен неоном при низком давлении (10–15 мм. рт. ст.). Рассмотрим протекание электрического тока через газоразрядную лампу.

Газы в естественном состоянии состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, т.е. не содержат свободных зарядов и поэтому не проводят электрический ток. Газ становится проводником тока, если часть молекул ионизируется, т.е. расщепляется на положительные и отрицательные ионы (или положительный ион и электрон). Ионизация возникает под влиянием различных воздействий на газ: космические лучи, нагрев газа и т.д. Наряду с ионизацией в газе происходит и обратный процесс – рекомбинации, т.е. восстановления положительных и отрицательных ионов в нейтральные атомы.

В зависимости от способа ионизации газа электрический разряд в газе называется несамостоятельным или самостоятельным. Если ионизация газа осуществляется под действием внешнего ионизатора, то разряд, возникающий в газе, называется несамостоятельным разрядом. В этом случае электропроводность газа создается за счет внешнего ионизатора и с прекращением его действия такой разряд также прекращается. Как правило, несамостоятельный разряд не сопровождается свечением. Если электрический ток в газе сохраняется после прекращения действия внешнего ионизатора, то такой разряд называется самостоятельным газовым разрядом.

Для осуществления самостоятельного газового разряда кинетическая энергия ускоренного электрона должна быть равной энергии ионизации W_H атомов газа:

$$\frac{m_e v^2}{2} = W_H, \quad (1)$$

где m_e – масса электрона, v – его скорость. Кинетическую энергию электрона можно выразить через разность потенциалов $\Delta\varphi$ в точках между двумя последовательными соударениями электрона с атомами.

Она выражается через длину свободного пробега L и напряженность электрического поля E :

$$\frac{m_e v^2}{2} = e\Delta\varphi = eLE, \quad (2)$$

где e – заряд электрона.

Таким образом, подставляя (2) в (1), получим

$$eLE = W_{II}, \quad (3)$$

Напряжение зажигания U_3 самостоятельного газового разряда равно

$$U_3 = Ed = \frac{W_{II}d}{eL}, \quad (4)$$

где d – расстояние между электродами неоновой лампы.

Как видно из уравнения (4), напряжение зажигания зависит от энергии ионизации молекул газа (от типа газа в баллоне), расстояния между электродами и длины свободного пробега электрона. С увеличением длины свободного пробега электрона (с уменьшением давления газа) напряжение зажигания уменьшается.

При атмосферном давлении для создания самостоятельного разряда требуются очень большие электрические напряжения. В неоновой лампе (рис. 2) такой разряд осуществляется при низком давлении (10 – 15 мм. рт. ст.), т.е. требуются относительно небольшое напряжение.

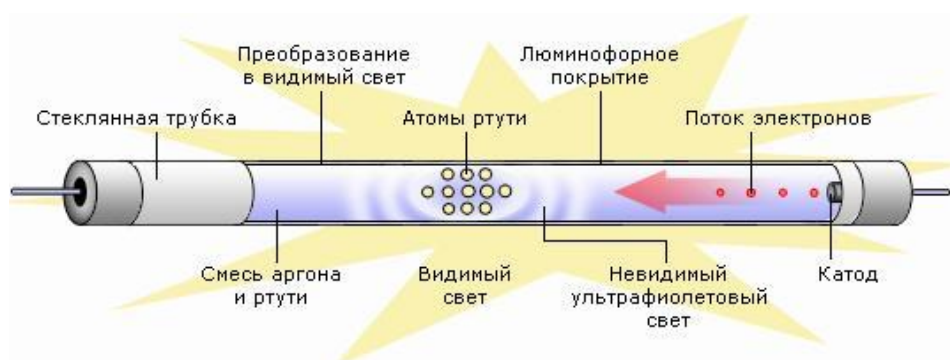


Рис. 2 – Внутренняя структура неоновой лампы.

Самостоятельный разряд сопровождается оптическими явлениями – газ светится при протекании по нему тока. Причинами свечения газа являются следующие процессы: рекомбинации электронов с ионами; столкновение ионов с нейтральными атомами; столкновение

электронов (прошедших расстояние, меньшее длины свободного пробега) с нейтральными атомами. Во всех этих процессах образуются атомы в возбуждённом состоянии. При переходе их в основное состояние излучаются кванты света.

Как было сказано выше, электрические релаксационные колебания состоят из двух процессов: зарядки конденсатора от источника питания и разрядки через неоновую лампу. В электрической цепи (рис. 1) конденсатор C , параллельно которому присоединена неоновая лампа, заряжается от источника ε через большое сопротивление R .

Второй закон Кирхгофа, записанный для контура (1–2–3–4) (см. рис. 1), имеет вид:

$$I(R + r) + U = \varepsilon, \quad (5)$$

где I – мгновенное значение силы тока в цепи, U – мгновенное значение напряжения на конденсаторе, r – внутреннее сопротивление источника тока. Так как $R \gg r$, значением r можно пренебречь. Тогда уравнение вынужденного релаксационного процесса с временем релаксации $\tau_1 = RC$ будет иметь вид:

$$U = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}), \quad (6)$$

Если бы неоновая лампа отсутствовала, то напряжение на конденсаторе росло бы с течением времени согласно кривой на графике (рис. 3) и стремилось бы к ЭДС источника тока ε .

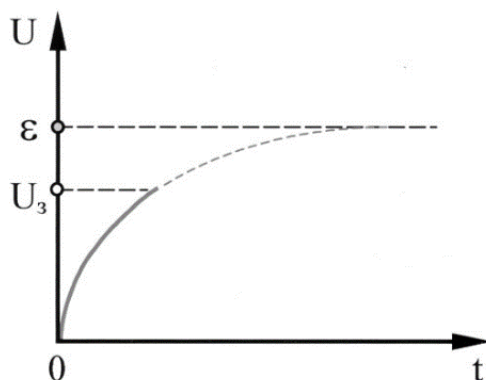


Рис. 3 – Зависимость напряжения на конденсаторе во время его зарядки через сопротивление.

При наличии неоновой лампы процесс протекает иначе. Когда напряжение на конденсаторе достигает напряжения зажигания U_3 , в лампе возникает электрический разряд и конденсатор начинает быстро разряжаться.

Если сопротивление неоновой лампы в зажжённом состоянии много меньше сопротивления R , то за время процесса разрядки конденсатора через неоновую лампу подзарядка конденсатора от источника тока через сопротивление R незначительна и второй закон Кирхгофа для контура (2–5–6–3–2) (рис. 1) имеет вид:

$$IR_{л} + U = 0, \quad (7)$$

где $R_{л}$ – сопротивление неоновой лампы в зажжённом состоянии.

Закон, по которому уменьшается напряжение в конденсаторе при его разрядке, имеет вид

$$U = U_3 e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (8)$$

где $\tau_2 = R_{л}C$ – время релаксации, характеризующее разрядку конденсатора через сопротивление неоновой лампы в зажжённом состоянии.

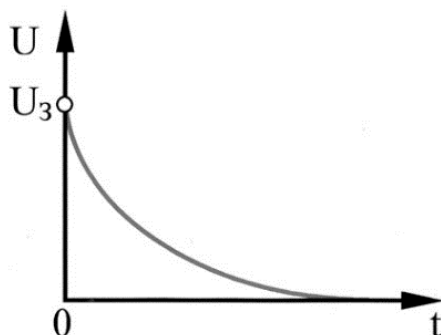


Рис. 4 – Зависимость напряжения на конденсаторе во время его разрядки через неоновую лампу.

При подключении к схеме (рис. 1) источника постоянного электрического напряжения U конденсатор C заряжается через сопротивление R . Когда напряжение U на конденсаторе станет равным напряжению зажигания U_3 , неоновая лампа зажигается, и конденсатор практически мгновенно разряжается через нее до напряжения гашения U_f . При этом неоновая лампа гаснет, и конденсатор снова начинает заряжаться. Такой процесс будет повторяться периодически, то есть в системе возникает колебательный процесс, заключающийся в периодической зарядке и разрядке конденсатора (рис. 5). Однако полной разрядки конденсатора не происходит.

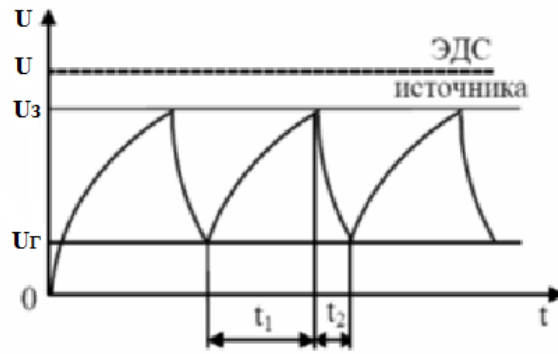


Рис. 5 – График зависимости напряжения на конденсаторе от времени.

Рассмотренные электрические колебания в системе являются релаксационными. Период T релаксационных колебаний состоит из суммы времён t_1 (время зарядки конденсатора от напряжения гашения U_r до напряжения зажигания U_3) и t_2 (время разрядки конденсатора через зажжённую неоновую лампу от U_3 до U_r): $T = t_1 + t_2$, где

$$t_1 = \tau_1 \ln \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon - U_3}, \quad (9)$$

$$t_2 = \tau_2 \ln \frac{U_3}{U_r}, \quad (10)$$

Отсюда период колебаний

$$T = t_1 + t_2 = \tau_1 \ln \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon - U_3} + \tau_2 \ln \frac{U_3}{U_r}, \quad (11)$$

При наличии в системе релаксационных колебаний видны периодические вспышки света лампы, разделённые паузами. Соотношение времён вспышек и пауз, определяемых уравнениями (9) и (10), зависит от времён релаксации τ_1 и τ_2 , которые зависят от величины ёмкости конденсатора C , сопротивления R и сопротивления лампы R_L в зажжённом состоянии ($\tau_1 = RC$ и $\tau_2 = R_L C$).

При $R \ll R_L$ получаем $\tau_1 \leq \tau_2$ так, что колебания прекращаются и лампа постоянно горит. При $R \gg R_L$ наблюдаются кратковременные вспышки разделённые продолжительными паузами. В этом случае можно считать, что $t_2 \ll t_1$ и период колебаний определяется только временем t_1 :

$$T = t_1 \ln \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon - U_3}, \quad (12)$$

Используя последнее условие при известной емкости конденсатора можно определить сопротивление и наоборот. Из уравнения (12) получим:

$$\tau = \tau_1 = \frac{T}{\ln \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon - U_3}}, \quad (13)$$

Далее, используя соотношение

$$\tau = RC, \quad (14)$$

можно получить неизвестные значения R или C .

Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе используется следующее оборудование и принадлежности:

1. *Источник тока ВУП-2* – является универсальным источником выпрямленного напряжения для питания радиотехнических устройств в общеобразовательных учреждениях.
2. *Осциллограф С1-73* – прибор для исследования электрических сигналов и их визуализации.
3. *Миллиамперметр* – прибор для измерения силы тока. Шкалу амперметров градуируют в микроамперах, миллиамперах, амперах или килоамперах в соответствии с пределами измерения прибора.
4. *Вольтметр* – прибор для измерения электрического напряжения. Шкалу вольтметров градуируют в милливольтгах, вольтах или киловольтах в соответствии с пределами измерения прибора.
5. *Соединительные провода*.
6. *Переменный резистор* – пассивный элемент электрических цепей, обладающий переменным значением электрического сопротивления, предназначенный для линейного преобразования силы тока в напряжение и напряжения в силу тока.
7. *Неоновая лампа* – газоразрядная лампа, наполненная неоном под низким давлением (цвет свечения — оранжево-красный).
8. *Два полярных конденсатора* – конденсатор, предназначенный для применения в цепях постоянного и пульсирующего тока при постоянной полярности напряжения на его выводах.

Принадлежности, указанные в пунктах 6–8, собраны в пластмассовом корпусе для удобства работы с ними.

Внешний вид лабораторной установки



Рис. 6 – Внешний вид лабораторной установки по исследованию электрических релаксационных колебаний: 1 – источник тока ВУП-2, 2 – осциллограф С1-73, 3 – миллиамперметр, 4 – вольтметр, 5 – соединительные провода, 6 – переменный резистор, 7 – неоновая лампа, 8 – два полярных конденсатора.

Ход работы

1. Собрать электрическую цепь по рис. 7. Включить источник питания и осциллограф в сеть.

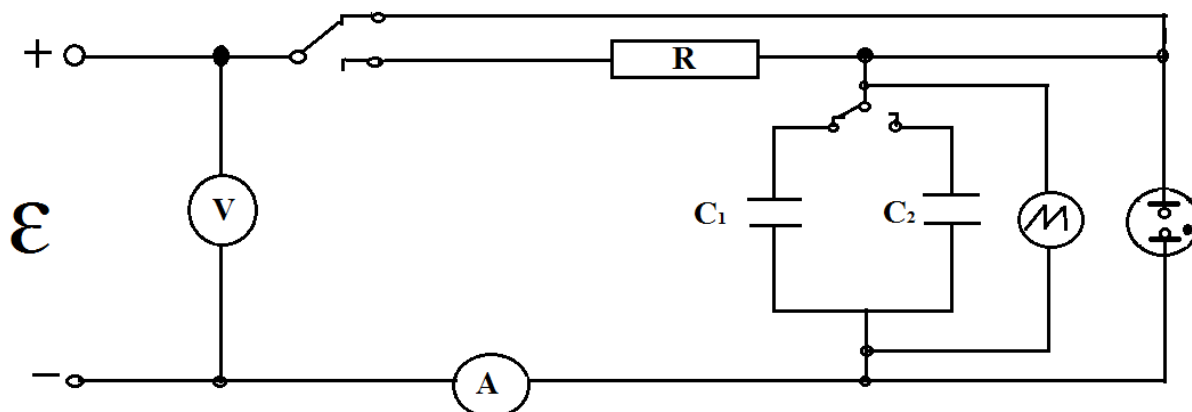


Рис. 7 – Электрическая схема экспериментальной установки.

2. Убедиться, что ручка переключателя RL на пластмассовом коробке находится в положении L , а регулятор напряжения установлен на 0.

3. Далее, необходимо включить приборы и снять вольт-амперную характеристику лампы. Для этого необходимо изменять ЭДС источника питания так, чтобы величина силы тока I изменялась в диапазоне от 3 до 10 мА (см. таблицу 1). При этом необходимо измерять также электрическое напряжение U на лампе. Записать полученные значения U в таблицу, построить график зависимости I от U и сделать вывод.

Таблица 1

I (мА)	3	4	5	6	7	8	9	10
U (В)								
$R_{л}$ (кОм)								

4. Далее, используя данные для U и I , необходимо рассчитать электрическое сопротивление $R_{л}$ лампы в зажженном состоянии, записать полученные значения в таблицу 1, построить график зависимости $R_{л}$ от U и сделать вывод.

5. Плавно увеличивая ЭДС источника питания, с помощью вольтметра определите напряжение U_3 зажигания разряда в неоновой лампе, а затем, плавно уменьшая напряжение, определите напряжение $U_г$ гашения разряда лампы. При этом полученные значения занесите в таблицу 2. Измерения повторите не менее трех раз. Определите средние значения $\overline{U_3}$ и $\overline{U_г}$ и также занесите их в таблицу 2.

Таблица 2

№	U_3 (В)	$U_г$ (В)
1		
2		
3		
	$\overline{U_3} =$ В	$\overline{U_г} =$ В

6. Поверните регулятор ЭДС источника питания в ноль, а ручку переключателя RL установите в положение R .

7. Далее, переключатель C поставьте в положение $C_1 = 1$ мкФ и выполните следующие действия:

1) поверните ручку переменного резистора по часовой стрелке в крайнее положение (в этом положении сопротивление резистора составляет $R_{\max} = 3.9$ МОм);

- 2) установите напряжение источника питания 110 В, т.е. немного выше напряжения зажигания лампы (при этом лампа начнет периодически зажигаться и погасать);
- 3) с помощью секундомера определите время t в течение которого система выполнит $N = 10$ колебаний и найдите период колебаний $T_{\text{эксп}}$ по формуле $T_{\text{эксп}} = \frac{t}{N}$;
- 4) выполните аналогичные измерения периода колебаний еще два раза и запишите полученные значения в таблицу 3;

Таблица 3

№	$C_1 = 1 \text{ мкФ}$			$C_2 = 4,7 \text{ мкФ}$		
	$T_{\text{расч}}$	$T_{\text{эксп}}$	ΔT	$T_{\text{расч}}$	$T_{\text{эксп}}$	ΔT
1						
2						
3						
		$\overline{T_{\text{эксп}}} =$			$\overline{T_{\text{эксп}}} =$	

- 5) вычислите среднее значение периода колебаний $T_{\text{эксп}}$, сравните его с расчетным периодом $T_{\text{расч}}$, полученным по формуле (13), и сделайте вывод о разнице ΔT между экспериментальным и расчетным периодами;
 - б) повторите опыт при значении $C_2 = 4,7 \text{ мкФ}$ (при этом возьмите $N = 10$), результаты занесите в таблицу 3 и сделайте вывод.
8. Далее, необходимо немного уменьшить сопротивление. Для этого поверните ручку резистора против часовой стрелки так, чтобы период колебаний увеличился примерно на половину, и выполните следующие действия:
- 1) с помощью секундомера определите время t в течение которого система выполнит $N = 10$ колебаний и найдите период колебаний $T_{\text{эксп}}$;
 - 2) зная емкость конденсатора C_1 определите R_1 сопротивление резистора по формуле (13), время релаксации τ_1 по формуле (14) и занесите результаты в таблицу 4;
 - 3) не изменяя положение ручки резистора, повторите опыт для конденсатора C_2 ;

- 4) определите сопротивление R_2 резистора по формуле (13), время релаксации τ_2 по формуле (14); занесите полученные значения в таблицу 4, сравните их со значениями для случая C_2 и сделайте выводы;

Таблица 4

C_1		C_2	
R_1 , МОм	τ_1 , с	R_2 , МОм	τ_2 , с

9. Далее, повернув ручку резистора по часовой стрелке в крайнее положение (т.е. до значения R_{\max}) для обоих конденсаторов исследуйте зависимость периода колебаний T от напряжения питания. В результате вы должны получить таблицу значений параметров, построить соответствующие графики и сделать вывод.
10. Сделайте общие выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какой электрический разряд в газе называется несамостоятельным?
2. Каков механизм возникновения самостоятельного разряда?
3. При каких условиях в газе может возникнуть самостоятельный электрический разряд?
4. Дайте определение релаксационного процесса. Каким основным параметром он характеризуется?
5. Что называют временем релаксации системы?
6. Как объясняют не экспоненциальный характер поведения некоторых релаксационных систем?
7. Что называют электрической релаксацией?
8. Что называют электрическими релаксационными колебаниями?
9. От каких параметров RC-цепи зависит период электрических релаксационных колебаний?
10. Как изменяется период релаксационных колебаний при уменьшении сопротивления цепи?
11. Как изменяется период релаксационных колебаний при уменьшении ёмкости конденсатора?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. – СПб.: Лань, 2011. – 348 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Том 3. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015 г. – 656 с.
3. Детлаф А.А., Яворский В. М. Курс физики. Том 2. Электричество и магнетизм. – М.: «Высшая школа», 1999 г. – 384с.
4. Калашников С.Г. Электричество. 6-е издание. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004 г. – 624 с.
5. Трофимова Т.И. Курс физики. 11-е издание. – М.: «Высшая школа», 2006 г. – 560 с.
6. Орир Д. Физика. Полный курс: примеры, задачи, решения. – М. : КДУ, 2015. – 752 с.
7. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т. 2. Электрические и электромагнитные явления. – СПб. : Лань, 2008. – 528 с.

Научно-исследовательская работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ

Цель работы:

– определение температуры (точки) Кюри на примере ферритового кольца.

Приборы и принадлежности:

- электрическая плитка;
- трансформатор на ферритовом кольце;
- источник переменного тока (выпрямитель В-24 (учебный));
- термопара;
- мультиметр (2 шт.).

Теоретическая часть

Точка Кюри (или температура Кюри) – температура фазового перехода 2-го рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (например, магнитной – в ферромагнетиках, электрической – в сегнетоэлектриках, кристаллохимической – в упорядоченных сплавах). Названа по имени французского учёного Пьера Кюри.

При температуре ниже точки Кюри ферромагнетики обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью и определённой магнитно-кристаллической симметрией. В точке Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его самопроизвольной намагниченности («магнитного порядка») и изменения симметрии, в результате ферромагнетик становится парамагнетиком.

В сегнетоэлектриках и антисегнетоэлектриках в точке Кюри тепловое движение атомов сводит к нулю самопроизвольную упорядоченную ориентацию электрических диполей элементарных ячеек кристаллической решётки.

Таким образом, во всех случаях фазовых переходов II рода (типа точки Кюри) в веществе происходит исчезновение того или иного вида атомного «порядка» (упорядоченной ориентации магнитных или электрических моментов, дальнего порядка в распределении атомов по узлам кристаллической решётки в сплавах и т. п.). Вблизи точки Кюри в веществе происходят характерные резкие изменения многих физических свойств (например, теплоёмкости, магнитной восприим-

чивости и др.), достигающие экстремального значения, что и используется для точного определения температуры фазового перехода.

Обычно небольшое изменение внешних условий (температуры, давления) приводит к небольшому изменению свойств. Поэтому зависимость «свойство – внешнее условие» можно изобразить в виде непрерывной кривой. Но иногда небольшое изменение внешних условий приводит к «катастрофическим» последствиям: либо одна из характеристик тела изменяется скачкообразно, либо появляется свойство, которого не было. Такой переход, в общем случае, называется фазовым переходом.

Пример появления (исчезновения) свойства описан выше, например, при температуре Кюри $T_{кр}$ появляется (исчезает) намагниченность ферромагнитных твёрдых тел. При $T > T_{кр}$ намагниченности нет вовсе, нет её и в самой точке Кюри (конечно, в отсутствие магнитного поля). Появление (исчезновение) намагниченности, т.е. переход «ферромагнетик–парамагнетик», является, как уже упоминалось выше, примером фазового перехода 2-го рода. При этом переходе не происходит скачкообразного изменения объема системы и выделения/поглощения скрытой теплоты. Однако, изменяются скачкообразно другие термодинамические параметры, такие как теплоемкость, сжимаемость и др.

Отметим, что есть вещества, у которых в определенных условиях скачком изменяется намагниченность, т.е. происходит магнитный фазовый переход 1-го рода. Однако, при переходе «ферромагнетик–парамагнетик» скачком меняется теплоёмкость тела, скачкообразного изменения объёма не происходит.

Известно, что равновесное значение магнитного момента минимизирует энергию (точнее, свободную энергию F) тела. Этим свойством, минимизировать свободную энергию, обладают многие характеристики физических систем. Чтобы не ограничиваться только магнитными свойствами, параметр, характеризующий некоторое свойство тела, обозначим буквой η . Свободная энергия F – функция этого параметра ($F = F_\eta$). При фазовом переходе 1-го рода η при некоторой критической температуре $T_{кр}$ имеет скачок, а при фазовом переходе 2-го рода $\eta(T_{кр}) \equiv 0$ при $T \geq T_{кр}$ и $\eta(T) \neq 0$ при $T < T_{кр}$; $T_{кр}$ – температура (точка) фазового перехода 2-го рода, если $\eta(T_{кр}) = 0$. Равновесное значение $\eta = -\eta(T)$ находится из условия минимума:

$$\frac{dF}{d\eta} = 0, \quad \frac{d^2F}{d\eta^2} > 0. \quad (1)$$

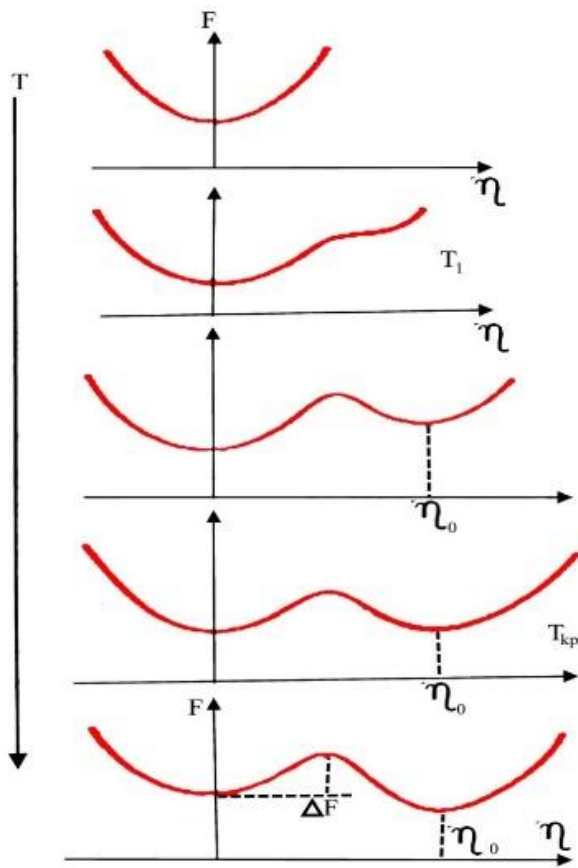


Рис. 2 – Трансформация (при изменении температуры T) зависимости свободной энергии F от параметра η при фазовом переходе 1-го рода. При $T = T_1$ зарождается новый минимум (при $\eta \neq 0$). При $T_1 < T < T_{кр}$ состояние с $\eta = \eta_0 \neq 0$ метастабильно, а при $T > T_{кр}$ – стабильно.

не хватает геологических эпох, и тело устойчиво существует в метастабильном состоянии (хорошим примером необычайно устойчивого метастабильного состояния служит алмаз, самопроизвольное превращение которого в графит никто не наблюдал).

При фазовом переходе 2-го рода при появлении нового минимума (ниже $T_{кр}$) прежний минимум превращается в максимум (рис. 2). Естественно, никакие переохлаждение или перегрев невозможны.

При изменении температуры «деформируется» функция $F(\eta)$, что, по существу, и служит причиной фазового перехода. На рис. 2 показан случай фазового перехода 1-го рода, а на рис. 2 – фазового перехода 2-го рода. Видно, что при фазовом переходе 1-го рода на кривой $F = F(\eta)$ зарождается новый минимум, и при $T > T_{кр}$ он оказывается более глубоким, чем первый. Однако для того, чтобы попасть в «новый» минимум из «старого», система должна преодолеть определённый потенциальный барьер – перевалить через «горб» высоты ΔF , отделяющий один минимум от другого. При низких темпера-

турах такой процесс, как правило, очень затруднителен (его вероятность пропорциональна $e^{-\Delta F/RT}$ и система может оказаться в переохлаждённом или перегретом состоянии. Такие состояния называют *метастабильными*. Иногда для перехода из метастабильного состояния в стабильное

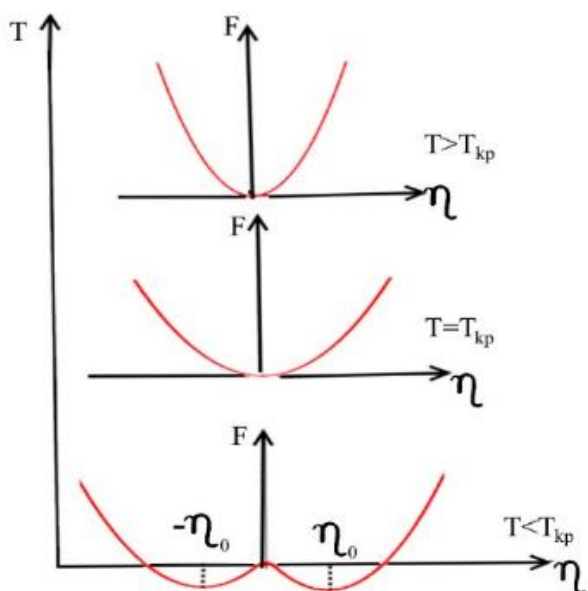


Рис. 2 – То же, что и на рис. 2, но для фазового перехода 2-го рода. Устойчивое (при $T > T_{кр}$) состояние с $\eta = 0$ превращается в неустойчивое и возникает (при $T < T_{кр}$) устойчивые состояния с $\eta = \pm\eta_0 \neq 0$.

ся вдоль оси x . Для развития аналогии будем именовать параметр η «обобщённой координатой», а состояние системы, описываемое параметром η , «телом». Итак, в точке с обобщённой координатой η , где $F(\eta)$ имеет минимум, тело находится в устойчивом или метастабильном состоянии. Это значит, что тело за счёт теплового движения совершает малые колебания именно вокруг этой точки.

Далее, внимательнее рассмотрим рис. 1. Кривая $F = F(\eta)$ на этом рисунке (при $T = T_{кр}$) очень упрощённая, ведь при бесконечно малом изменении температуры она должна превратиться в кривую с максимумом и двумя минимумами. Ясно, что при $T = T_{кр}$ амплитуда колебаний велика. Учесть их оказалось очень сложной задачей. Только в самые последние годы физики научились с большой степенью точности описывать свойства физических систем в непосредственной близости от точки фазового перехода 2-го рода. Для этого, как ни странно, понадобилось рассматривать свойства физических систем, существующих (на бумаге, конечно), в пространствах с дробной размерностью (наш мир трёхмерен, плоскость – двумерное пространство, линия – одномерное).

Эта картина, конечно, очень схематична и приближительна, но она качественно правильно отражает отличие фазового перехода 2-го рода от фазового перехода 1-го рода. Расхождение между истинной и упрощённой картинами особенно существенно в случае фазового перехода 2-го рода (из сказанного ниже будет ясно, с чем связана сложность задачи при исследовании именно фазовых переходов 2-го рода). Рис. 1 и 2, изображающие зависимость $F(\eta)$, как мы уже имели случай заметить, очень напоминают зависимость потенциальной энергии U от координаты x , позволяющую исследовать условия устойчивости тела, движущегося

Параметр η , описывающий фазовый переход 2-го рода, часто называют *параметром порядка*. В случае перехода «ферромагнетик-парамагнетик» причина этого названия очевидна: магнитный момент есть мера упорядочения атомных спинов.

Чтобы проиллюстрировать смысл и название параметра порядка η . Приведём пример фазового перехода 2-го рода – упорядочение сплава CuZn. На рис. 3 показана кристаллическая решётка этого сплава. При высоких температурах атомы Cu и Zn распределены беспорядочно – с равной вероятностью (равной, естественно, 1/2) они занимают любые узлы кристаллической решётки. Начиная с некоторой температуры (её тоже называют температурой Кюри), вероятности начинают отличаться от 1/2, вначале чуть-чуть, а при стремлении температуры к нулю

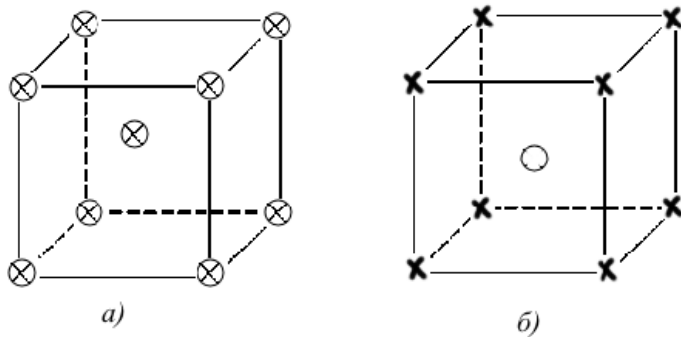


Рис. 3 – Расположение атомов Zn (крестики) и Cu (кружочки) в упорядочивающемся сплаве: (а) при $T > T_{кр}$, (б) при $T = 0$.

вероятности стремятся к нулю и к единице соответственно, наступает полный порядок.

Как правило, при фазовом переходе 2-го рода изменяется симметрия тела. На этот факт впервые обратил внимание Л. Д. Ландау и, основываясь на нем, построил феноменологическую теорию фазовых переходов 2-го рода. Действительно, при возникновении ферромагнетизма выделяется избранное направление в системе атомных магнитных моментов, а при упорядочении сплава меняется период кристаллической решётки. И вот, что интересно: в непосредственной близости к $T_{кр}$ параметр порядка ещё бесконечно мал, а симметрия уже изменилась. Она изменяется скачком, ведь у тела либо одна симметрия, либо другая. Непрерывный переход от одной симметрии к другой невозможен.

Существуют вещества – ферримагнетики – твёрдые тела, которые обладают спонтанной намагниченностью. Ферримагнетики имеют доменную структуру, состоящую из двух или более подрешеток, связанных антиферромагнитно (антипараллельно). Поскольку подрешетки образованы атомами (ионами) различных химических элементов или неодинаковым их количеством, они имеют различные по величине магнитные моменты, направленные антипараллельно (см. рис.

4). В результате появляется отличная от нуля разность магнитных моментов подрешеток, приводящая к спонтанному намагничиванию кристалла. Таким образом, ферри-

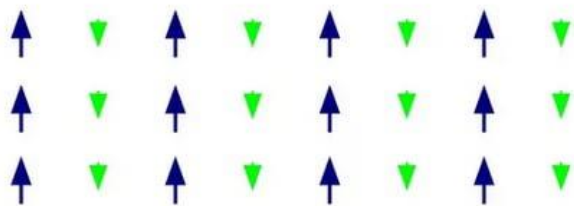


Рис. 4 – Магнитная структура ферри-магнетика. Стрелками показаны магнитные моменты атомов подрешёток твёрдого тела.

магнетика можно рассматривать как нескомпенсированные антиферромагнетики (у них магнитные моменты атомов не скомпенсированы). Различные подрешётки в них состоят из различных атомов или ионов, например, ими могут быть различные ионы железа, Fe^{2+} и Fe^{3+} .

У ферримагнетиков доменная структура, как и у ферромагнетиков, образуется при температурах ниже некоторой критической. Аналогично ферромагнетикам, у ферримагнетиков в этой критической точке происходит разрушение характерной для них магнитной структуры (магнитных подрешёток). Эту критическую точку также называют точкой Кюри.

К ферримагнетикам применимы все магнитные характеристики, вводимые для ферромагнетиков. В отличие от ферромагнетиков, они имеют высокое значение удельного сопротивления, меньшую величину индукции насыщения, более сложную температурную зависимость индукции.

Ферромагнетизм в металлах объясняется наличием обменного взаимодействия, которое образуется между соприкасающимися атомами, а также взаимной ориентацией спиновых магнитных моментов. В ферримагнетиках магнитные моменты ионов ориентированы антипараллельно, и обменное взаимодействие происходит не непосредственно, а через ион кислорода O^{2-} . Такое обменное взаимодействие называют косвенным обменом или сверхобменом.

Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом, различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты – соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов. Широко применяются в качестве магнитных материалов в промышленности. Их отличает низкая величина температуры Кюри, что делает их удобными объектами для исследования и применения в учебных лабораториях.

Метод исследования

Для определения температуры Кюри магнитных твёрдых тел существует множество способов. Большая часть из этих способов сводится к нагреванию образца, и фиксированию температуры, при которой происходит резкое уменьшение его намагниченности. В нашем случае будет использоваться подобный метод. При этом регистрация изменения намагниченности будет происходить за счёт явления электромагнитной индукции.

Суть метода состоит в следующем. Исследуемый образец вместе с парой проволочных обмоток образуют трансформатор. При протекании тока по первичной обмотке (намагничивающей), намагничивается и весь сердечник трансформатора. При этом во вторичной обмотке индуцируется ЭДС. С увеличением температуры образца магнитный поток, пронизывающий приёмную катушку, уменьшается за счёт снижения намагниченности сердечника. При приближении к точке Кюри намагниченность резко падает почти до нуля. Вследствие этого происходит резкое падение измеряемой ЭДС индукции. Таким образом, для определения точки Кюри необходимо измерить температурную зависимость ЭДС индукции приёмной катушки трансформатора, сердечником которого является феррит.

Температуру образца можно измерять с помощью термопары. Действие термопары основано на явлении Зеебека. Если составить цепь из двух разнородных металлов и места соединения поддерживать при различной температуре T_1 и T_2 (T_1 – температура на холодном конце спая, T_2 – температура на горячем конце спая), то в цепи возникнет ЭДС, называемая термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС) (рис. 5). Термо-ЭДС обусловлена двумя причинами:

1. Уровень Ферми металлов зависит от температуры, поэтому контактная разность потенциалов для спаев, находящихся при различной температуре, не одинакова и сумма скачков потенциала в замкнутой цепи отлична от нуля.

2. Вдоль каждого проводника, даже однородного, возникает градиент концентрации электронов, если он нагрет неоднородно. Это приводит к диффузии электронов в сторону более холодного конца провод-

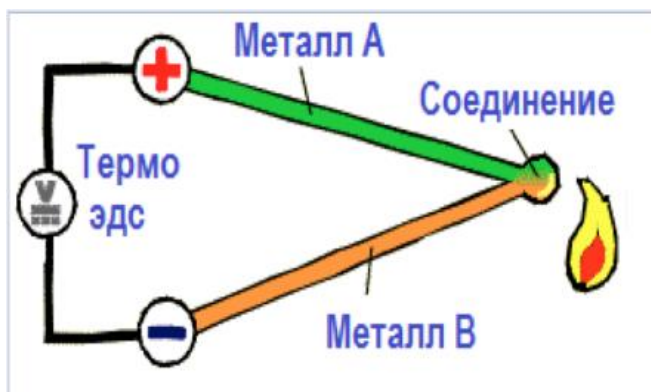


Рис. 5 – Схематичное устройство термопары.

ника.

Учёт влияния обоих факторов приводит к следующему выражению для термо-ЭДС ε термопары: $\varepsilon = C \times (T_2 - T_1)$, где C – постоянная, численно равная ЭДС, возникающей в термопаре при разности температур спаев в 1 К. Таким образом, ЭДС термопары пропорциональна разности температур её спаев. Практика, однако, показывает, что линейная зависимость хорошо выполняется лишь в небольшом интервале температур. При большой их разности эта зависимость отличается от линейной, т.е. коэффициент C не остаётся постоянным. Поэтому термопары, в принципе, нуждаются в градуировке.

Термопара вместе с милливольтметром (в нашем случае используется мультиметр) образуют термометр. Градуировочные графики для такого термометра приводятся для случая, когда температура одного из спаев равна 0 °С (его, как уже было сказано, называют «холодным»). Если температура этого спая выше нуля градусов по Цельсию, то термометр покажет несколько меньшую, по сравнению с действительной, температуру. В этом случае нужно ввести поправку, прибавив к показаниям термометра температуру свободного («холодного») спая, т.е. комнатную температуру.

Термопары изготавливают, как правило, из сплавов различного типа. В данной работе для измерения температуры феррита применяется хромель-алюмелевая термопара (хромель – сплав, состоящий из следующих элементов: хром Cr (8,7–10 %), никель Ni (89–91 %), кремний Si (0,4%), медь Cu (0,25%), марганец Mn (0,3%), кобальт Co (0,6–1,2%); алюмель – сплав, состоящий из следующих элементов: никель Ni (93–96 %), алюминий Al (1,8–2,5 %), марганец Mn (1,8–2,2 %), кремний Si (0,8–1,2 %).

Описание лабораторной установки

На электрическую плитку 1 помещается исследуемый образец 3 (рис. 6) – ферритовое кольцо. Вокруг образца намотана первичная (намагничивающая) и вторичная (измерительная) обмотки. На первичную обмотку подаётся переменный ток с помощью источника тока 5. Измерительная (вторичная) обмотка 2 замкнута на мультиметр, работающий в режиме милливольтметра. Таким образом, обмотки образуют трансформатор с магнитным сердечником, роль которого выполняет ферритовое кольцо. Переменный ток I_1 , протекающий по первичной катушке, создаёт в ней магнитный поток,

$$\Phi_1 = L_1 I_1, \quad (1)$$

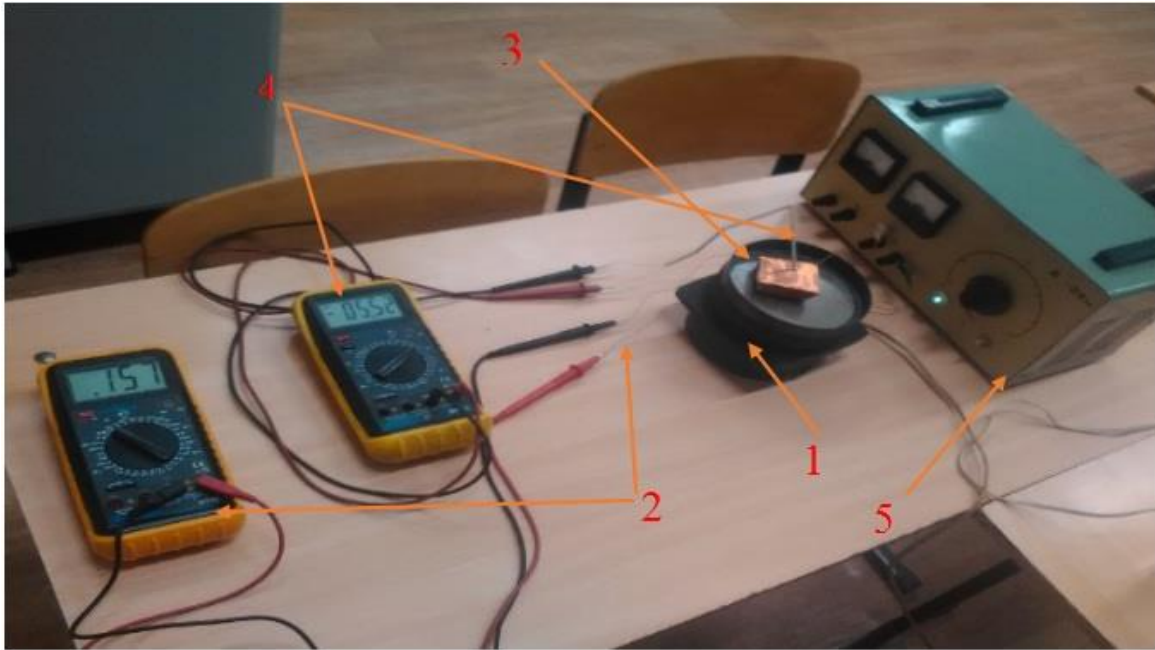


Рис. 6 – Внешний вид лабораторной установки: (1) нагревательный элемент (плитка), (2) милливольтметр, (3) исследуемый образец внутри медного теплового экрана, (4) электронный термометр (милливольтметр + термопара), (5) источник переменного ЭДС (В-24М).

где L_1 – индуктивность первичной катушки. Индуктивность катушки зависит от ее объема V , числа витков на единицу длины n_1 и магнитной проницаемости вещества μ . В нашем случае, для испытуемого образца индуктивность катушки определяется формулой

$$L_1 = \mu_0 \mu n_1^2 V. \quad (2)$$

Магнитный поток Φ_1 пронизывает и вторичную катушку с числом витков N_2 . При изменении тока I_1 меняется магнитный поток Φ_1 так, что во вторичной катушке наводится ЭДС индукции:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = L_1 N_2 \frac{dI_1}{dt}. \quad (3)$$

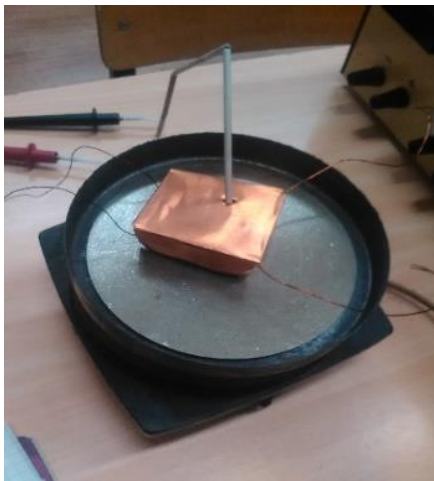


Рис. 7 – Термопара установлена через отверстие теплового экрана.

Необходимо отметить, что первичная и вторичная обмотки, намотанные на ферритовое кольцо, имеют разное количество витков, а также разный диаметр провода.

Температура образца измеряется термометром 4, состоящим из термопары и мультиметра, работающего в режиме микровольтметра. Горячий спай термопары прикрепляется к ферритовому кольцу через отверстие медного теплового экрана, как показано на рис. 7.

После того, как температура на образце достигает температуры Кюри, магнитная проницаемость μ образца падает от большого значения до единицы. Индуктивность L_1 , а вместе с ней и ЭДС индукции во вторичной катушке ε_2 резко уменьшается (см. формулы (2) и (3)), что и регистрирует экспериментатор.

Ход работы

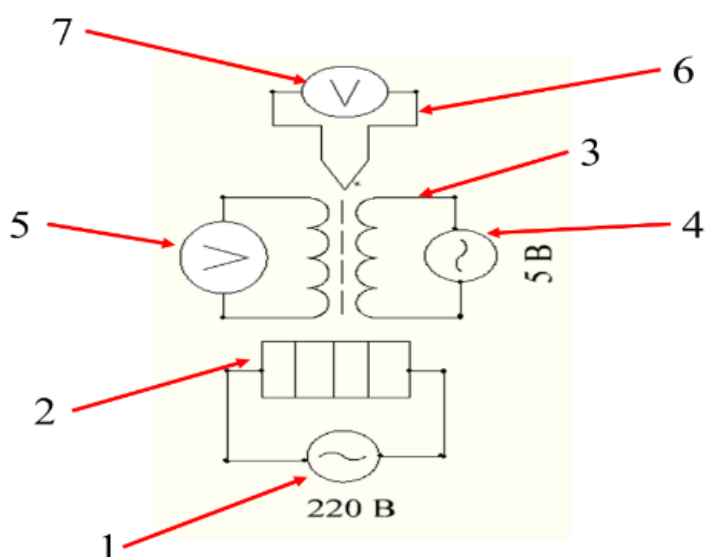


Рис. 8 – Схема экспериментальной установки: (1) источник переменного ЭДС на 220 В; (2) нагревательный элемент; (3) тороидальный трансформатор; (4) источник переменного ЭДС на 5 В (В-24М); (5) милливольтметр; (6) термопара; (7) микровольтметр.

1. Собрать электрическую цепь, указанную на схеме (см. рис. 8). Важно, чтобы термопара не касалась плитки. Её необходимо установить так, чтобы горячий спай термопары прикасался средней части ферритового кольца (см. рис. 9).

2. Сообщить преподавателю о собранной цепи, чтобы он выполнил её проверку.

3. Включить источник тока, выставить на нем напряжение не более 5 В (!), включить мультиметры и плитку в электрическую сеть.

4. По мере прогресса нагревания образца следует внимательно следить за показаниями мультиметра с термопарой, а также за показаниями ЭДС вторичной обмотки.

5. Ждём до тех пор, пока ЭДС вторичной обмотки не начнёт быстро уменьшаться.

6. После того, как значение ЭДС перестанет изменяться и достигнет значений близких к нулю, необходимо прекратить нагрев образца. Для этого необходимо отключить печь от электрической сети.



Рис. 9 – Горячий спай термопары равноудален от нижней и верхней поверхностей ферритового кольца.

7. Далее, при охлаждении необходимо записывать ЭДС индукции вторичной обмотки ε_2 и температуру (ЭДС термопары $\varepsilon_{терм}$), которая ей соответствует в данный момент времени. Измерения необходимо продолжать до тех пор, пока значение ЭДС не перестанет увеличиваться.

8. Измерения, описанные в пунктах (4-7), необходимо проделать трижды. При этом необходимо записать значения ЭДС в таблицу 1.

Таблица 1

№ эксперимента	$\varepsilon_{терм}$ [мВ]	ε_2 [мВ]	t [°C]
1			
2			
3			

Обработка результатов измерений

1. По формуле $t = 17.33 + 26.01\varepsilon_{терм}$ необходимо пересчитать полученные значения ЭДС термопары $\varepsilon_{терм}$ в температуру в градусах Цельсия и записать значения в таблицу 1.
2. По данным таблицы 1 нужно построить три графика зависимости ЭДС вторичной обмотки ε_2 от температуры t .
3. Далее, необходимо найти температуру Кюри. Для этого на полученных графиках необходимо найти интервал температур, где происходит быстрое падение ЭДС. После этого необходимо

определить среднее значение температуры t_{cp} между начальной t_n и конечной t_k значениями температуры в найденном интервале. Полученному среднему значению температуры соответствует температура t_c , которая и является температурой (точкой) Кюри. Вышеописанную процедуру определения t_c проделать для всех графиков $\varepsilon_2(t)$.

4. Вычислите среднее значение t_c .
5. Вычислить абсолютную и относительную погрешности измерений величины t_c .
6. Сравнить полученное значение t_c со справочным с учетом полученных погрешностей (для используемого в данной работе феррита температура Кюри составляет 110°C).
7. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются магнетиками?
2. Расскажите о магнитных свойствах ферромагнетиков.
3. Расскажите о магнитных свойствах ферримагнетиков.
4. Дайте определение точки Кюри.
5. Какой фазовый переход называют фазовым переходом 2-го рода?
6. Расскажите об общей термодинамике фазовых переходов 2-го рода.
7. Почему у ферромагнетиков (или ферримагнетиков) температура Кюри разная? Чем это обосновано?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. – СПб.: Лань, 2011. – 348 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Том 3. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 656 с.
3. Калашников С. Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 624 с.

4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Оникс 21 век, Мир и Образование, 2005. – 464 с.
5. Парселл Э. Электричество и магнетизм. Берклевский курс физики. – СПб.: Лань, 2005. – 420 с.
6. Белов К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных телах. – М: Государственное издательство технико теоретической литературы, 1951. – 256 с.
7. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 192 с.
8. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – СПб.: Лань, 2011. – 288 с.
9. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты. Энциклопедический справочник. Том 1. Магниты и магнитные системы. СПб. : Лик, 2004. – 358 с.

Приложение

Пример оформления отчета о НИР

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный педагогический университет»

Кафедра общей физики

УДК _____

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ТЕМА

*Тепловые эффекты, возникающие при нагреве металлического стекла
 $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$*

Выполнил: студент 1 курса
магистратуры ФМФ по направлению
«Педагогическое образование»
профиля «Физическое образование»
Иван Иванович Иванов

Руководитель:
заведующий кафедрой общей физики,
д. ф.-м. н.,
профессор В.А. Хоник

Воронеж 2018

Реферат

Реферат должен содержать:

– сведения об объеме отчета, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве частей отчета, количестве использованных источников;

– перечень ключевых слов (Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста отчета, которые в наибольшей мере характеризуют его содержание и обеспечивают возможность информационного поиска. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и печатаются прописными буквами в строку через запятые);

– текст реферата.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы и их новизну;
- основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики;
- степень внедрения;
- рекомендации по внедрению или итоги внедрения результатов НИР;
- область применения;
- экономическую эффективность или значимость работы;
- прогнозные предположения о развитии объекта исследования.

Пример составления реферата на отчет о НИР

Реферат

Отчет с. 14, 1 ч., 6 рис., 10 источников.

ЭНТАЛЬПИЯ ПЛАВЛЕНИЯ, КОЛЕБАНИЯ, ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД, КРИСТАЛЛ, ПОЛЗУЧЕСТЬ, АМОΡФНЫЕ СПЛАВЫ.

В качестве объекта исследования выбрано металлическое стекло $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$.

Цель работы – теоретический анализ научной литературы, экспериментальное исследование тепловых эффектов и физическая интерпретация полученных результатов, написание отчета о научно-исследовательской работе на тему: «Тепловые эффекты, возникающие при нагреве металлического стекла $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$ ».

Метод или методология проведения работы – анализ, систематизация и обобщение теоретических и экспериментальных сведений.

В результате работы был осуществлен анализ научной литературы, проведены серии экспериментов, направленных на исследование тепловых эффектов в металлическом стекле $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$, предпринята попытка интерпретации полученных результатов в рамках межузельной теории Гранато.

Содержание

Реферат	3
Введение	6
Основная часть	8
Заключение	15
Список литературы	16

Введение

Введение должно содержать оценку современного состояния решаемой научно-технической проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения НИР, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них, сведения о метрологическом обеспечении НИР. Во введении должны быть показаны актуальность и новизна темы, связь данной работы с другими научными исследованиями.

Во введении промежуточного отчета по этапу НИР должны быть приведены цели и задачи этапа исследований, их место в выполнении НИР в целом.

Во введении заключительного отчета о НИР помещают перечень наименований всех подготовленных промежуточных отчетов по этапам и их инвентарные номера.

Основная часть

В основной части отчета приводят данные, отражающие сущность, методику и основные результаты выполненной НИР.

Основная часть должна содержать:

1. Выбор направления исследований, включающий его обоснование, методы решения задач и их сравнительную оценку, описание выбранной общей методики проведения НИР.

2. Процесс теоретических и (или) экспериментальных исследований, включая определение характера и содержания теоретических исследований, методы исследований, методы расчета, обоснование необходимости проведения экспериментальных работ, принципы действия разработанных объектов, их характеристики.

3. Обобщение и оценку результатов исследований, включающих оценку полноты решения поставленной задачи и предложения по дальнейшим направлениям работ, оценку достоверности полученных результатов и технико-экономической эффективности их внедрения и их сравнение с аналогичными результатами отечественных и зарубежных работ, обоснование необходимости проведения дополнительных исследований, отрицательные результаты, приводящие к необходимости прекращения дальнейших исследований.

Пример основной части отчета о НИР

(НИР № 3 Изучение электрических релаксационных колебаний)

1. В результате исследования вольт-амперной характеристики (ВАХ) лампы были получены значения электрического напряжения и силы тока, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

I (мА)	3	4	5	6	7	8	9	10
U (В)	71	73	74	76	78	79	81	82
$R_{л}$ (кОм)	23,7	18,25	14,8	12,7	11,14	9,9	9	8,2

В соответствии с табличными данными построен график зависимости $I(U)$:

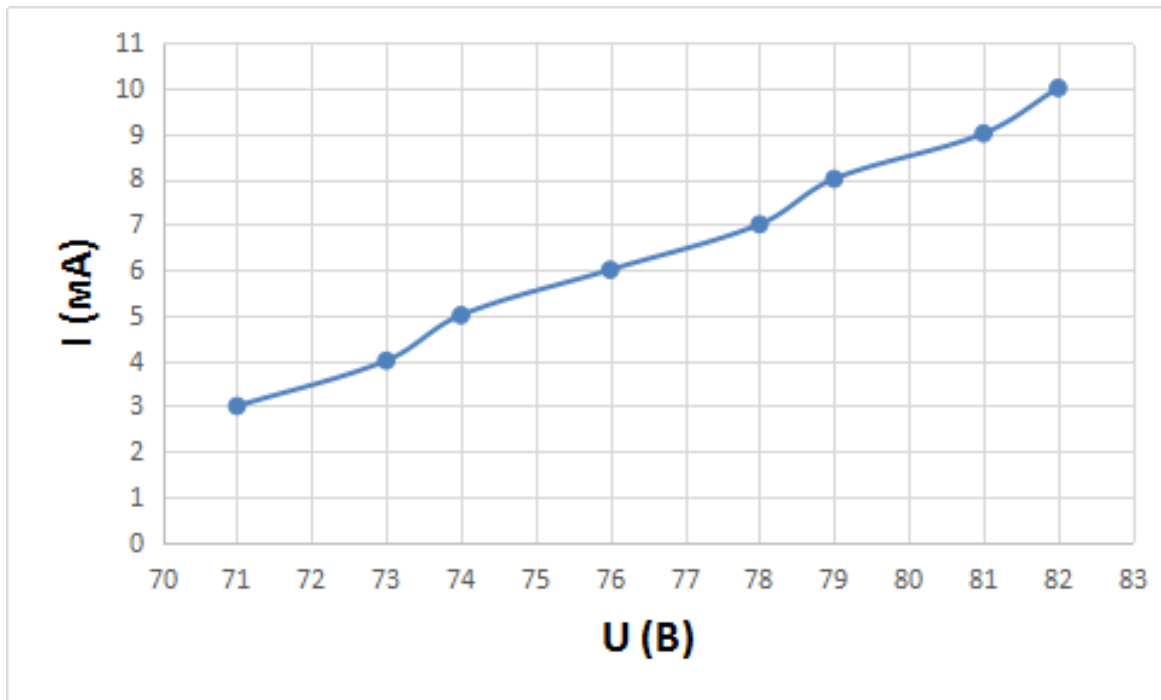


Рис. 1 – Вольт-амперная характеристика неоновой лампы.

2. Вычислено сопротивление лампы по формуле $R = \frac{U}{I}$. Результаты расчёта представлены в таблице 1.

В соответствии с табличными данными построен график зависимости $R_{л}(U)$:

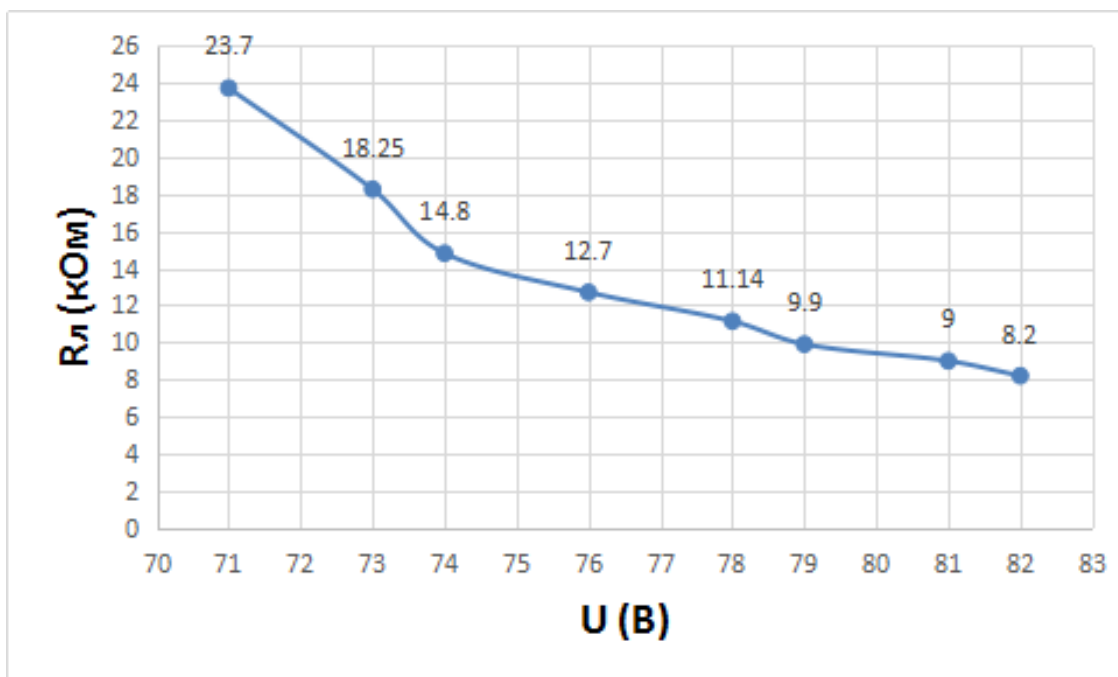


Рис. 2 – Зависимость сопротивления лампы R_L от напряжения U .

Вывод: Сопротивление лампы R_L зависит от напряжения U .

3. При увеличении напряжения U было определено напряжение зажигания U_3 разряда в неоновой лампе, а затем при уменьшении напряжения напряжение U_r гашения разряда. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

№	U_3 (В)	U_r (В)
1	74	59
2	74	60
3	75	59
	$\overline{U_3} = 69$ В	$\overline{U_r} = 59$ В

4. После, переключатель C поставим в положение $C_1 = 1$ мкФ.

- 1) Выставим сопротивление резистора $R_{\max} = 3.9$ МОм.
- 2) Установим напряжение источника питания 110 В.
- 3) С помощью секундомера определим время t в течение которого система выполнит $N = 10$ колебаний и найдём период колебаний $T_{\text{экс}}$

по формуле $T_{\text{экс}} = \frac{t}{N}$. Выполним три измерения:

Таблица 3

№	$C_1 = 1$ мкФ			$C_2 = 4,7$ мкФ		
	$T_{\text{расч}}$ (с)	$T_{\text{экс}}$ (с)	ΔT (с)	$T_{\text{расч}}$ (с)	$T_{\text{экс}}$ (с)	ΔT (с)
1		1,9			9,9	
2		2			10	
3		1,9			9,9	
	1,4	$\overline{T_{\text{экс}}} = 1,93$	0,53	6,42	$\overline{T_{\text{экс}}} = 9,93$	3,51

$$(1) T_{\text{экс}} = \frac{19}{10} = 1,9 \text{ с,}$$

$$(2) T_{\text{экс}} = \frac{20}{10} = 2 \text{ с,}$$

$$(3) T_{\text{экс}} = \frac{19}{10} = 1,9 \text{ с.}$$

4) Найдём среднее экспериментальное значение периода колебаний

$$\overline{T}_{\text{экс}} : \overline{T}_{\text{экс}} = \frac{T_{\text{экс}1} + T_{\text{экс}2} + T_{\text{экс}3}}{3}$$

$$\overline{T}_{\text{экс}} = \frac{1,9 + 2 + 1,9}{3} = 1,93 \text{ с.}$$

5) Вычисляем систематическую и случайную погрешность измерений периода колебаний:

Систематическая погрешность:

$$\overline{T}_{\text{экс}} = \frac{1,9 + 2 + 1,9}{3} = 1,93 \text{ с,}$$

Абсолютная погрешность i -го значения:

$$\Delta T_{\text{экс}i} = \left| \overline{T}_{\text{экс}} - T_{\text{экс}i} \right|.$$

$$\Delta T_{\text{экс}1} = |1,93 - 1,9| = 0,03 \text{ с,}$$

$$\Delta T_{\text{экс}2} = |1,93 - 2| = 0,07 \text{ с.}$$

Абсолютная погрешность:

$$\Delta T_{\text{экс}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{\text{экс}i}$$

$$\Delta T_{\text{экс}} = \frac{0,03 + 0,07 + 0,03}{3} = 0,04 \text{ с,}$$

$$T_{\text{экс}} = 1,93 \pm 0,04 \text{ с.}$$

Относительная погрешность:

$$E = \frac{\Delta T_{\text{экс}}}{\overline{T}_{\text{экс}}} \cdot 100\% = \frac{0,04}{1,93} \cdot 100\% = 2,1\% .$$

Случайная погрешность:

Средняя квадратичная ошибка:

$$S_{\overline{T}_{\text{экс}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{\text{экс}i})^2}{n(n-1)}} ,$$

$$S_{\overline{T}_{\text{экс}}} = \sqrt{\frac{(0,03 + 0,07 + 0,03)^2}{3(3-1)}} = \frac{0,0169}{6} = 0,0028 \text{ с,}$$

По выбранной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и числу проведённых измерений $n = 3$ определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$:

$$t_{\alpha}(n) = 4,3,$$

Доверительный интервал:

$$\Delta T_{\text{эксн}} = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\overline{T_{\text{эксн}}}},$$

$$\Delta T_{\text{эксн}} = 4,3 \cdot 0,0028 = 0,01 \text{ с},$$

$$T_{\text{эксн}} = 1,93 \pm 0,01 \text{ с для } \alpha = 0,95,$$

Относительная погрешность:

$$E = \frac{\Delta T_{\text{эксн}}}{T_{\text{эксн}}} \cdot 100\% = \frac{0,01}{1,93} \cdot 100\% = 0,52\% .$$

б) Вычислим период колебаний $T_{\text{расч}}$, используя формулу

$$\tau = \tau_1 = \frac{T_{\text{расч}}}{\ln \frac{\varepsilon - U_{\Gamma}}{\varepsilon - U_3}} . \text{ Отсюда } T_{\text{расч}} = RC \ln \frac{\varepsilon - U_{\Gamma}}{\varepsilon - U_3} :$$

$$T_{\text{расч}} = 3,9 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \ln \frac{110 - 59}{110 - 74} = 3,9 \cdot 0,35 = 1,4 \text{ с} .$$

7) Таким образом, абсолютное отклонение экспериментального значения периода колебаний от расчётного составляет

$$\Delta T = \overline{T_{\text{эксн}}} - T_{\text{расч}} :$$

$$\Delta T = 1,93 - 1,4 = 0,53 \text{ с}$$

или $\Delta T / T_{\text{расч}} = 37,9\% .$

Промежуточный вывод: В ходе выполнения работы было установлено, что $T_{\text{эксн}}$ на 37,9 % больше, чем $T_{\text{расч}}$.

5. 1) Повторим опыт при значении $C_2 = 4,7 \text{ мкФ}$:

$$(1) T_{\text{эксн}} = \frac{99}{10} = 9,9 \text{ с},$$

$$(2) T_{\text{эксн}} = \frac{100}{10} = 10 \text{ с},$$

$$(3) T_{\text{эксн}} = \frac{99}{10} = 9,9 \text{ с} .$$

2) Найдём среднее экспериментальное значение периода колебаний

$$\overline{T_{\text{эксн}}} = \frac{T_{\text{эксн1}} + T_{\text{эксн2}} + T_{\text{эксн3}}}{3} ,$$

$$\overline{T_{\text{эксн}}} = \frac{9,9 + 10 + 9,9}{3} = 9,93 \text{ с} .$$

3) Вычисляем систематическую и случайную погрешность измерений периода колебаний:

Систематическая погрешность:

$$\overline{T}_{\text{экс}} = \frac{9,9 + 10 + 9,9}{3} = 9,93 \text{ с,}$$

Абсолютная погрешность i -го значения:

$$\Delta T_{\text{экс } i} = \left| \overline{T}_{\text{экс}} - T_{\text{экс } i} \right|.$$

$$\Delta T_{\text{экс } 1} = |9,93 - 9,9| = 0,03,$$

$$\Delta T_{\text{экс } 2} = |9,93 - 10| = 0,07.$$

Абсолютная погрешность:

$$\Delta T_{\text{экс}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{\text{экс } i}$$

$$\Delta T_{\text{экс}} = \frac{0,03 + 0,07 + 0,03}{3} = 0,04$$

$$T_{\text{экс}} = 9,93 \pm 0,04,$$

Относительная ошибка:

$$E = \frac{\Delta T_{\text{экс}}}{\overline{T}_{\text{экс}}} = \frac{0,04}{9,93} \cdot 100\% = 0,4\%$$

Случайная погрешность:

Средняя квадратичная ошибка:

$$S_{\overline{T}_{\text{экс}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{\text{экс } i})^2}{n(n-1)}},$$

$$S_{\overline{T}_{\text{экс}}} = \sqrt{\frac{(0,03 + 0,07 + 0,03)^2}{3(3-1)}} = \frac{0,0169}{6} = 0,0028 \text{ с,}$$

По выбранной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и числу проведённых измерений $n = 3$ определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$:

$$t_{\alpha}(n) = 4,3,$$

Доверительный интервал:

$$\Delta T_{\text{экс}} = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\overline{T}_{\text{экс}}},$$

$$\Delta T_{\text{экс}} = 4,3 \cdot 0,0028 = 0,01 \text{ с,}$$

$$T_{\text{экс}} = 9,93 \pm 0,01 \text{ с для } \alpha = 0,95,$$

$$E = \frac{\Delta T_{\text{экс}}}{T_{\text{экс}}} \cdot 100\% = \frac{0,01}{9,93} \cdot 100\% = 0,1\%$$

4) Находим расчётное значение периода колебаний $T_{\text{расч}}$:

$$T_{\text{расч}} = 3,9 \cdot 10^6 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \ln \frac{110-59}{110-74} = 6,42 \text{ с},$$

5) Таким образом, абсолютное отклонение экспериментального значения периода колебаний от расчётного составляет:

$$\Delta T = \overline{T_{\text{экс}}} - T_{\text{расч}} :$$

$$\Delta T = 9,93 - 6,42 = 3,51 \text{ с}$$

или

$$\Delta T / T_{\text{расч}} = 54,7\% .$$

Промежуточный вывод: В ходе выполнения работы было установлено, что $T_{\text{экс}}$ на 54,7 % больше, чем $T_{\text{расч}}$.

6. Уменьшили сопротивление R так, чтобы период колебаний T увеличился в 2 раза:

1) С помощью секундомера определили время t в течение которого система выполнит $N = 10$ колебаний и нашли период колебаний

$$T_{\text{экс}} :$$

(1) C_1 : $N = 10$, $t = 12$ с,

$$T_{\text{экс}} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ с},$$

$$\tau = \tau_1 = \frac{T_{\text{расч}}}{\ln \frac{\varepsilon - U_{\Gamma}}{\varepsilon - U_3}} \Rightarrow R = \frac{T_{\text{расч}}}{C \ln \frac{\varepsilon - U_{\Gamma}}{\varepsilon - U_3}},$$

$$R_1 = \frac{1,2}{1 - 10^{-6} \cdot \ln \frac{110-59}{110-74}} = \frac{1,2}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,35} = 3,43 \cdot 10^6 \text{ Ом},$$

$$\tau_2 = 3,43 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 3,43 \text{ с}.$$

2) C_2 : $N = 10$, $t = 60$ с,

$$T_{\text{экс}} = \frac{60}{10} = 6 \text{ с},$$

$$\tau = \tau_1 = \frac{T_{расч}}{\ln \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon - U_3}} \Rightarrow R = \frac{T_{расч}}{C \ln \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon - U_3}},$$

$$R_2 = \frac{6}{4,7 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{110 - 59}{110 - 74}} = \frac{6}{4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,35} = 3,64 \cdot 10^6 \text{ Ом},$$

$$\tau_2 = 3,64 \cdot 10^6 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} = 17,1 \text{ с}.$$

Таблица 4

$C_1 = 1 \text{ мкФ}$		$C_2 = 4,7 \text{ мкФ}$	
$R_1, \text{ МОм}$	$\tau_1, \text{ с}$	$R_2, \text{ МОм}$	$\tau_2, \text{ с}$
3,43	3,43	3,64	17,1

Промежуточный вывод: Из вычислений мы видим, что сопротивление R почти одинаково, а время релаксации τ зависит от емкости C и сопротивления R .

7. Далее, повернув ручку резистора по часовой стрелке в крайнее положение (т.е. до значения R_{\max}) для обоих конденсаторов исследуем зависимость периода колебаний T от напряжения питания ε .

Таблица 5

$\varepsilon, \text{ В}$	$C_1 = 1 \text{ мкФ}$				$C_2 = 4,7 \text{ мкФ}$			
	$T_1, \text{ с}$			$\bar{T}_1, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$			$\bar{T}_2, \text{ с}$
	1	2	3		1	2	3	
100	2,5	2,5	2,5	2,5	13,1	13,2	13,1	13,13
105	2,2	2,2	2,2	2,2	11	10,9	10,9	10,93
110	1,9	2	1,9	1,93	9,9	10	9,9	9,93
115	1,7	1,7	1,8	1,73	8,6	8,5	8,6	8,63
120	1,5	1,5	1,5	1,5	7,7	7,7	7,8	7,73

Для конденсатора C_1 :

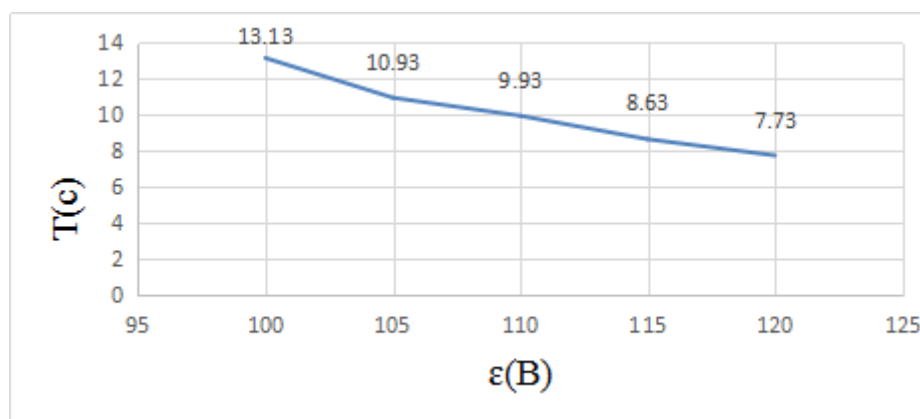
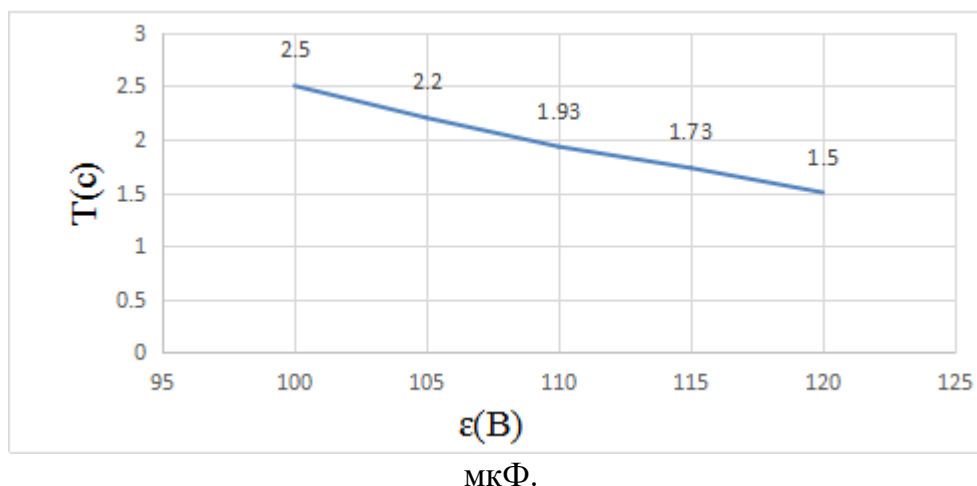


Рис. 3 – Зависимость периода колебаний T от напряжения питания ε для $C_1 = 1$



Для конденсатора C_2 :

Рис. 4 – Зависимость периода колебаний T от напряжения питания ε для $C_2 = 4,7$ мкФ

Промежуточный вывод: Из графиков $T(\varepsilon)$ видно, что период колебаний T зависит от напряжения питания ε .

Выводы по лабораторной работе: В ходе работы была измерена ВАХ газоразрядной лампы, измерены и вычислены периоды релаксационных колебаний при различных значения ёмкости конденсаторов и сопротивления резистора в RC-цепи. Кроме того, получены соответствующие времена релаксации. Экспериментальным путём показано от каких параметров зависит характер электрических релаксационных колебаний.

(НИР № 4 Определение точки Кюри)

1. В результате измерения ЭДС термопары и ЭДС на вторичной обмотке трансформатора был получен ряд значений, представленный в ниже таблице. При этом сделано 3 эксперимента.

2. Хромель-алюмелевая термопара была проградуирована по температурам плавления индия, олова и свинца, а также по температуре кипения воды. Была получена функция $t = 17.33 + 26.01\varepsilon_{терм}$, связывающая ЭДС термопары и температуру ферритового сердечника.

3. Далее, с помощью градуировочной функции экспериментальные данные для ЭДС термопары $\varepsilon_{терм}$ были пересчитаны в температуру.

4. В результате были получены три температурные зависимости ЭДС вторичной обмотки ε_2 (см. рис. 10).

5. Полученные графики (рис. 10) позволяют найти среднее значение температуры, которая соответствует температуре Кюри. Она составила 120.09°C , 122.69°C и 121.39°C для первого, второго и третьего экспериментов, соответственно.

7. Таким образом, было получено среднее значение температуры Кюри $t_{\text{экс}} = 121.39^\circ\text{C}$. При этом абсолютная и относительная погрешности измерений составили:

– систематическая погрешность:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{13.09 + 122.69 + 121.39}{3} = 121.39,$$

$$\Delta T_i = |\bar{t} - t_i| = |121.39 - 120.09| = 1.3,$$

$$\Delta t_i = |\bar{t} - t_i| = |121.39 - 122.69| = 1.3,$$

$$\Delta t_i = |\bar{t} - t_i| = |121.39 - 121.39| = 0,$$

№	$\varepsilon_{\text{терм}}$ [мВ]	ε_2 [мВ]	t [°C]	№	$\varepsilon_{\text{терм}}$ [мВ]	ε_2 [мВ]	t [°C]	№	$\varepsilon_{\text{терм}}$ [мВ]	ε_2 [мВ]	t [°C]
1	5.9	0.27	170.81	2	5.0	0.3	147.40	3	5.0	0.3	147.40
	5.6	0.28	163.01		4.9	0.3	144.80		4.9	0.3	144.80
	5.0	0.29	147.40		4.8	0.31	142.20		4.8	0.3	142.20
	4.5	0.3	134.39		4.6	0.32	136.99		4.8	0.31	142.20
	4.4	0.31	131.79		4.5	0.32	134.39		4.7	0.31	139.60
	4.3	0.32	129.19		4.5	0.33	134.39		4.6	0.31	136.99
	4.2	0.34	126.59		4.4	0.34	131.79		4.6	0.32	136.99
	4.2	0.36	126.59		4.3	0.34	129.19		4.5	0.32	134.39
	4.2	0.4	126.59		4.3	0.35	129.19		4.4	0.32	131.79
	4.2	0.45	126.59		4.3	0.36	129.19		4.4	0.33	131.79
	4.1	0.51	123.99		4.3	0.37	129.19		4.3	0.34	129.19
	4.1	0.6	123.99		4.3	0.4	129.19		4.3	0.35	129.19
	4.1	0.7	123.99		4.2	0.41	126.59		4.3	0.36	129.19
	4.1	0.8	123.99		4.2	0.5	126.59		4.3	0.37	129.19
4.1	0.9	123.99	4.2	0.6	126.59	4.3	0.38	129.19			
4.1	0.92	123.99	4.2	0.65	126.59	4.2	0.39	126.59			

4.0	1	121.39	4.2	0.7	126.59	4.2	0.4	126.59
4.0	1.1	121.39	4.2	0.75	126.59	4.2	0.45	126.59
3.9	1.15	118.78	4.2	0.8	126.59	4.2	0.5	126.59
3.9	1.20	118.78	4.2	0.85	126.59	4.2	0.55	126.59
3.9	1.25	118.78	4.1	0.86	123.99	4.2	0.6	126.59
3.8	1.28	116.18	4.1	0.9	123.99	4.2	0.65	126.59
3.8	1.35	116.18	4.1	0.97	123.99	4.2	0.7	126.59
3.7	1.4	113.58	4.0	1	121.39	4.2	0.75	126.59
3.7	1.45	113.58	4.0	1.1	121.39	4.1	0.8	123.99
3.6	1.5	110.98	4.0	1.15	121.39	4.1	0.85	123.99
3.1	1.5	97.97	4.0	1.2	121.39	4.1	0.9	123.99
			3.9	1.22	118.78	4.1	0.95	123.99
			3.9	1.3	118.78	4.0	1	121.39
			3.8	1.33	116.18	4.0	1.1	121.39
			3.8	1.4	116.18	3.9	1.2	118.78
			3.7	1.5	113.58	3.9	1.3	118.78
			3.6	1.5	110.98	3.8	1.3	116.18
			3.4	1.5	105.77	3.7	1.4	113.58
			3.3	1.5	103.17	3.6	1.5	110.98
			3.2	1.5	100.57	3.4	1.5	105.77
			3.1	1.5	97.97	3.3	1.5	103.17

$$\Delta t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \frac{1.3+1.3}{3} = 0.87,$$

$$t = 121.39 \pm 0.87 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$E = \frac{\Delta t}{t} = \frac{0.87}{121.39} = 0.007 \cdot 100\% = 0.7\%.$$

– случайная погрешность:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{13.09 + 122.69 + 121.39}{3} = 121.39,$$

$$\Delta t_i = |\bar{t} - t_i| = |121.39 - 120.09| = 1.3,$$

$$\Delta t_i = |\bar{t} - t_i| = |121.39 - 122.69| = 1.3,$$

$$\Delta t_i = |\bar{t} - t_i| = |121.39 - 121.39| = 0,$$

$$(\Delta t_i)^2 = 1.3^2 = 1.69,$$

$$(\Delta t_i)^2 = 1.3^2 = 1.69,$$

$$(\Delta t_i)^2 = 0^2 = 0,$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i^2)}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1.69 + 1.69 + 0}{3(3-1)}} = 0.75,$$

$$\Delta t = t_a(n) \cdot S_T = 9.9 \cdot 0.75 = 7.43,$$

$$t = 121.39 \pm 7.425 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ при } a = 0.99,$$

$$E = \frac{\Delta t}{t} = \frac{7.425}{121.39} = 0.06 \cdot 100\% = 6\% .$$

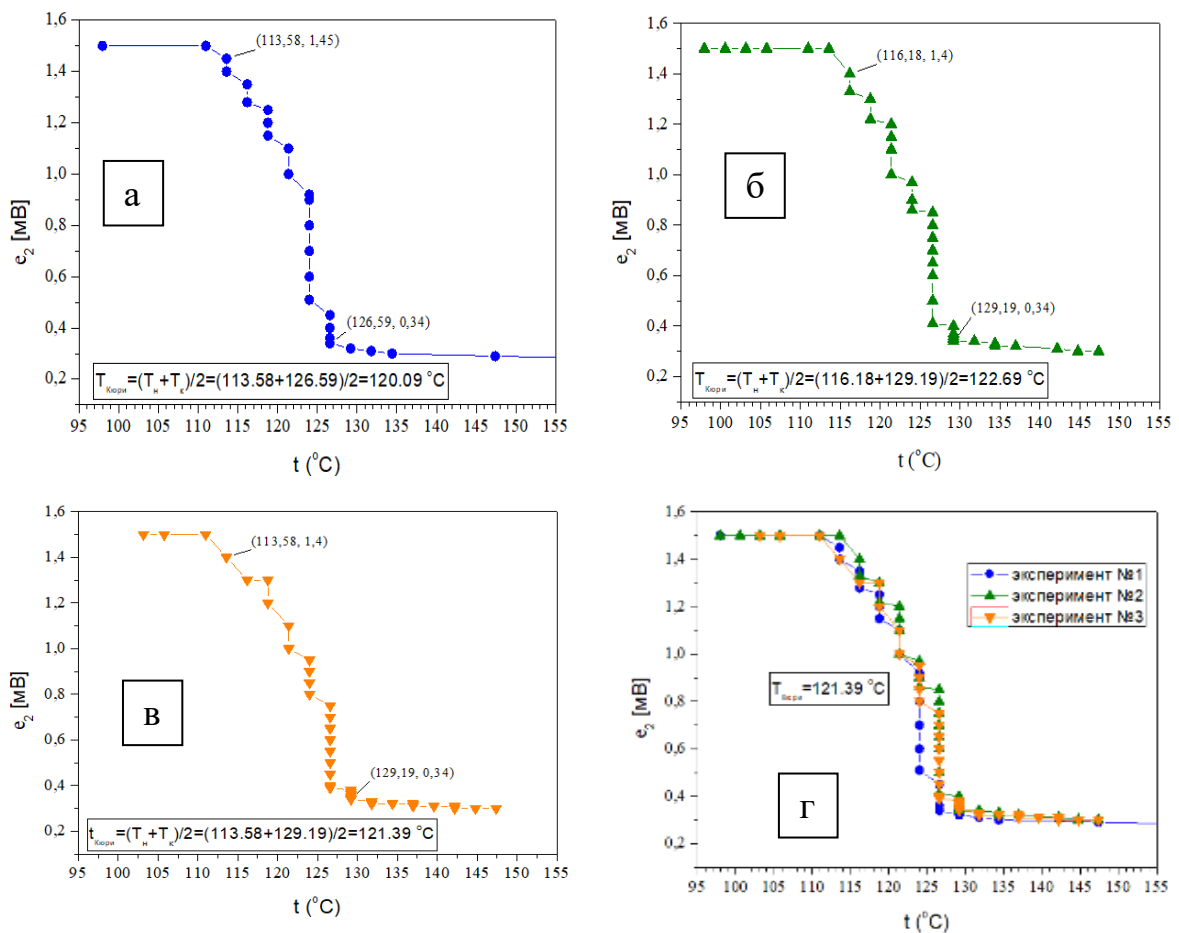


Рис. 1 – Зависимость ε_2 вторичной обмотки от температуры: (а–в) – результаты трёх независимых экспериментов, (г) – совокупность всех данных.

8. Сравним полученное значение температуры Кюри с табличным значением для данного феррита. При этом учтём погрешности измерения. Табличное значение температуры Кюри для используемого феррита со-

ставляет $t_{\text{табл}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$. Так как экспериментальное значение Кюри составляет $t_{\text{эк}} = 121.39 \text{ }^\circ\text{C}$, а абсолютная ошибка измерения составляет $\Delta t = 7.43 + 0.87 = 8.3 \text{ }^\circ\text{C}$, можно утверждать, что результат апробации даёт верные результаты.

Заключение

Заключение должно содержать:

- краткие выводы по результатам НИР или отдельных ее этапов;
- оценку полноты решений поставленных задач;
- разработку рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов НИР;
- результаты оценки технико-экономической эффективности внедрения;
- результаты оценки научно-технического уровня выполненной НИР в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

Список литературы

Список литературы должен содержать сведения об источниках, использованных при составлении отчета. Сведения об источниках приводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирьянов К.В. Калориметрические методы исследования. / К.В. Кирьянов. — Нижний Новгород : ННГУ, 2007. — 76 с.
2. Агеев Е.П. Практикум по физической химии. Термодинамика. / Е.П. Агеев, В.В. Лунин. — Москва : Академия, 2010. — 224 с.
3. Харитонова Е.П. Основы дифференциальной сканирующей калориметрии. / Е.П. Харитонова. — Москва : МГУ им. Ломоносова, 2010. — 17 с.
4. Паниковровский Т.Л. Об использовании дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования структурных особенностей органических и неорганических соединений. / Т.Л. Паниковровский, С.Н. Бритвин. — Санкт-Петербург : СПбГУ, 2013. — 4 с.
5. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. / А.Л. Емелина. - Москва : МГУ, 2009. - 42 с.
6. Майорова А.Ф. Термоаналитические методы исследования // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — №10 : Т. 1. — С. 50-54.
7. Свиридова Т.В. Химия твердого тела: топохимическая кинетика. / Т.В. Свиридова. — Минск : БГУ, 2011. — 23 с.
8. Кобелев Н.П. Тепловые и упругие эффекты при кристаллизации металлического стекла $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ / Н.П. Кобелев, В.А. Хоник. Г.В. Афонин // Физика твердого тела. — 2015. — №9 : Т. 57. — С. 1675-1678.
9. Савельев И.В. Курс общей физики. / И. В. Савельев. — Москва : Наука, 1970. — Т. 1 : С. 494.
10. Ruben S. Handbook of the elements. / S.Ruben. — La Salle IL : Open Court Publishing Co., 1985. — 110 p.
11. Yaws C.L. Handbook of properties of the chemical elements. / Carl L. Yaws. — Beaumont : Lamar University, 2011. — 503 p.
12. American Elements in a U.S. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.americanelements.com.
13. Afonin G.V. Universal relationship between crystallization-induced changes of the shear modulus and heat release in metallic glasses / G.V. Afonin, Y.P. Mitrofanov, A.S. Makarov, N.P. Kobelev, W.H. Wang, V.A. Khonik // Acta Materialia. — 2016. — Vol.115.—P.204-209.
14. Паршина Е.А. Исследование тепловых эффектов методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению

«Педагогическое образование», профиль «Физика», «Информатика».
– Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2017. – 46 с.

15. Попова Е.А. Разработка методических рекомендаций по изучению явления ползучести // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению «Педагогическое образование», профиль «Физика», «Информатика». – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2017. – 43 с.

16. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 192 с.

17. Белов К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных телах. – М: Государственное издательство технико теоретической литературы, 1951. – 256 с.

18. Черноуцан А.И. Физические свойства процесса стеклования. – Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 103–109.

19. Герасимов Г.Г. Разработка лабораторной работы по определению точки Кюри ферромагнетиков // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению «Педагогическое образование», профиль «Физика», «Информатика». – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2017. – 53 с.

20. Глущенко Е.В. Исследование электрических релаксационных колебаний в учебной лаборатории // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению «Педагогическое образование», профиль «Физика», «Информатика». – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2017. – 57 с.

21. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Том 3. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015 г. – 656 с.

22. Детлаф А.А., Яворский В. М. Курс физики. Том 2. Электричество и магнетизм. – М.: «Высшая школа», 1999 г. – 384с.

23. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты. Энциклопедический справочник. Том 1. Магниты и магнитные системы. СПб. : Лик, 2004. – 358 с.

24. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – СПб.: Лань, 2011. – 288 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Научно-исследовательская работа №1 Определение удельной теплоты плавления металлов.....	5
Научно-исследовательская работа №2 Изучение явления ползучести.....	40
Научно-исследовательская работа №3 Изучение электрических релаксационных колебаний.....	53
Научно-исследовательская работа №4 Определение точки Кюри.....	67
Приложение Пример оформления отчета о НИР	80
Список литературы	96

Для заметок

Учебное издание

АФОНИН Геннадий Витальевич, МИТРОФАНОВ Юрий Петрович,
ХОНИК Виталий Александрович

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРАКТИКА

Часть 2

*Учебно-методическое пособие для студентов магистратуры
физико-математического факультета, обучающихся по направлению
44.04.01 «Педагогическое образование», программа «Физическое образование»*

В авторской редакции

Подписано в печать 13.04.2018. Формат 60 х 84/16. Печать трафаретная.

Гарнитура «Таймс». Усл.-печ. л. 6,25. Уч.-изд. л. 5,81.

Тираж 16 экз. Заказ 34.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный педагогический университет».

Отпечатано с готового оригинала-макета

в издательско-полиграфическом центре ВГПУ.

394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (473) 255-58-32; 255-61-83.