

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ И
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«Аномалии термодинамических производных жидкостей
в прецизионных экспериментах с использованием упруготермического
эффекта»**

Выполнил студент 204 М группы
Канев Александр Игоревич

подпись студента

Научный руководитель

Кандидат физико-математических наук, доцент

Благонравов Лев Александрович

подпись научного руководителя

Допущен к защите «__» «_____» 2020г.

Зав. кафедрой

профессор Сысоев Н.Н. _____

подпись зав. кафедрой

Москва

2020

Оглавление

Введение.....	3
Литературный обзор.....	5
Глава 1. Описание экспериментального метода.....	9
1.1. Усовершенствованная методика измерения а.т.к.д. проводящих жидкостей посредством использования упруготермического эффекта..	9
Глава 2. Установка.....	10
2.1. Описание установки.....	10
2.2. Принцип работы установки.....	11
2.3. Измерительная ячейка.....	11
2.4. Генератор периодического сигнала давления.....	12
2.5. Схема формирования тактовых импульсов.....	13
2.6. Измерительный тракт сигнала температурного отклика и температуры образца.....	15
2.7. Метод синхронного усиления.....	17
2.8. Калибровка тракта температурного отклика	19
2.9. Сбор данных температурного отклика и температуры образца.....	20
2.10. Обработка экспериментальных данных.....	20
Глава 3. Измерения.....	21
3.1. Измерения амплитуды колебаний температуры.....	21
3.2. Исследование результатов амплитуды колебаний температуры.....	22
3.3. Сравнение результатов колебаний температуры различных экспериментов.....	24
3.4. Измерения амплитуды колебаний давления.....	25
Заключение.....	26
Выводы.....	28
Список литературы.....	29
Приложение.....	31

Введение

В последние десятилетия прошлого века в отечественных и зарубежных научных источниках появилось немало работ, свидетельствующих о наличии в поведении простых жидкостей (преимущественно металлических) некоторых особенностей. На температурных зависимостях ряда свойств были обнаружены особые точки, перегибы, а также скачки, которые связывались со структурными изменениями [1]. Отдельного рассмотрения заслуживает серия работ, в которых изучались температурные зависимости термодинамических параметров жидких щелочных металлов. В ряде исследований, выполненных на цезии и рубидии, изучалась эволюция микроструктуры этих металлов методом рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей [2,3,4]. В другой группе работ внимание было сосредоточено на изучении термодинамических свойств тех же объектов. В обеих группах работ были обнаружены особенности на температурных зависимостях изучаемых параметров, свидетельствующих о структурных изменениях [5,6]. Некоторые результаты были получены на физическом факультете на кафедре молекулярной физики. Был разработан модуляционный метод измерения адиабатического термического коэффициента давления (а.т.к.д.) γ жидких сред. В конце 90-х годов были выполнены измерения γ в жидком цезии [7,8,9]. На температурной зависимости γ в окрестности температуры 590К был обнаружен скачок. Положение его на температурной шкале совпадало с наблюдавшимися ранее особенностями на других свойствах [10]. К сожалению, природа этого эффекта остается не вполне понятной. Отчасти это связано с малой величиной эффекта. Величина скачка в тех экспериментах составила 5%, при этом случайная погрешность составила 2%. Позже была осуществлена модернизация установки, в результате которой погрешность измерений была сокращена до 0,3-1,0%. Результаты экспериментов, выполненных аспирантом Моденовым А.А., показали, что

погрешность измерений действительно сократилась [11]. При этом вместо резкого скачка, наблюдавшегося в 90-х годах на температурной зависимости а.т.к.д., в новых измерениях ступенеобразный переход выглядел значительно плавнее. Требуется дополнительные исследования температурной зависимости а.т.к.д. щелочных металлов. При этом остаются некоторые вопросы методического характера.

Целью моей работы является повторение экспериментов усовершенствованным методом а.т.к.д., чтобы выявить проблемные стороны эксперимента и совершенствовать процедуру измерений, сведя к минимуму вклады всех основных источников погрешности.

Литературный обзор

Нейтроннографические исследования на цезии и рубидии показали наличие скачка в положении первого максимума структурного фактора $S(k)$, а, следовательно, и резких изменений в структуре жидких металлов [12,13].

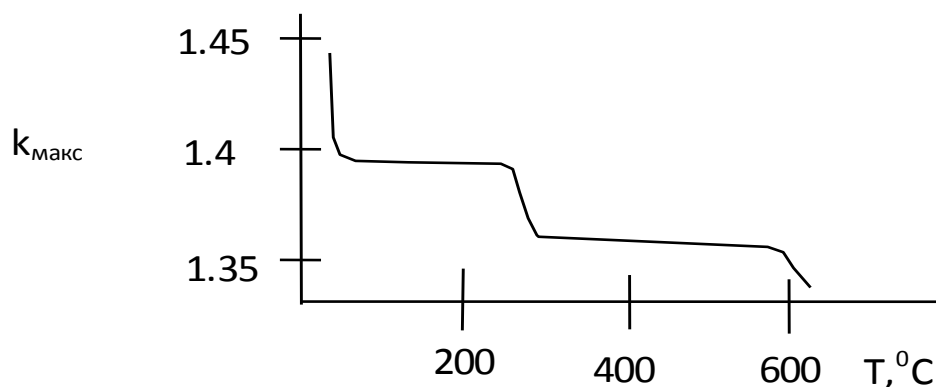


Рис.1. Зависимость скачков положения первого максимума $k_{\text{макс}}$ структурного фактора $S(k)$ цезия от температуры T по данным работы [3].

Аналогичный результат был получен в работе [4], в которой также методом рассеяния медленных нейтронов изучалось изменение микроструктуры жидкого рубидия. На рисунке 2 показана зависимость положения первого максимума структурного фактора q_1 (в обозначениях статьи [4]) от температуры. Три серии измерений с хорошей воспроизводимостью демонстрируют резкое изменение положения q_1 в температурном интервале от 520 до 570 К.

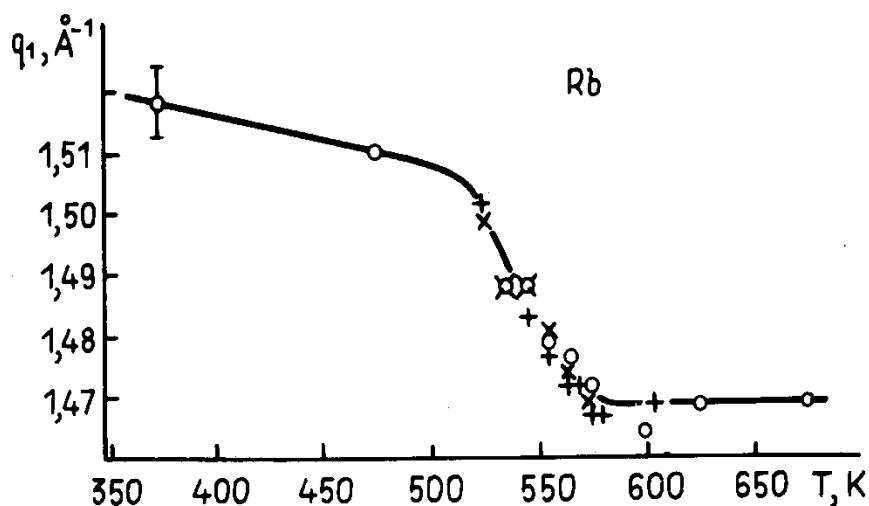


Рис.2. Температурная зависимость положения первого максимума структурного фактора жидкого рубидия [4]: 0 - I серия; × - II серия; + - III серия

Также были исследованы температурные зависимости плотности жидкого цезия. До температуры 590К отклонения от прямой имеют случайный характер, и начинают возрастать системно после 600К, что характеризует наличие излома на температурной зависимости плотности цезия (см. рис.3).

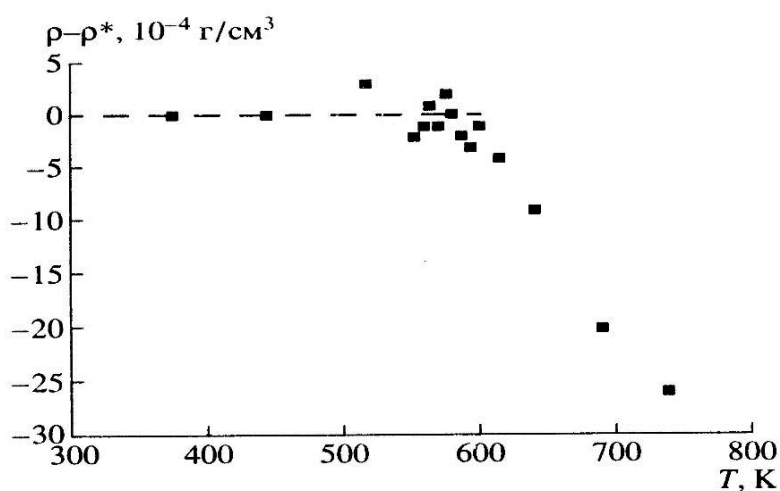


Рис.3. Отклонение плотности ρ жидкого цезия от аппроксимационной прямой в зависимости от температуры (по данным Сковородько С.Н.[12]).

В 1990 году Благодоровым Л.А. и Модхеном Ф. была разработана новая методика измерения адиабатического термического коэффициента давления (а.т.к.д.) [9]:

$$\gamma = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s \quad (1)$$

Основой методики было периодическое изменение (квазиадиабатического) давления.

Развитие данной методики измерения а.т.к.д. дало количественные результаты, которые были опубликованы Благодоровым Л.А. и Орловым Л.А. (рис.4).

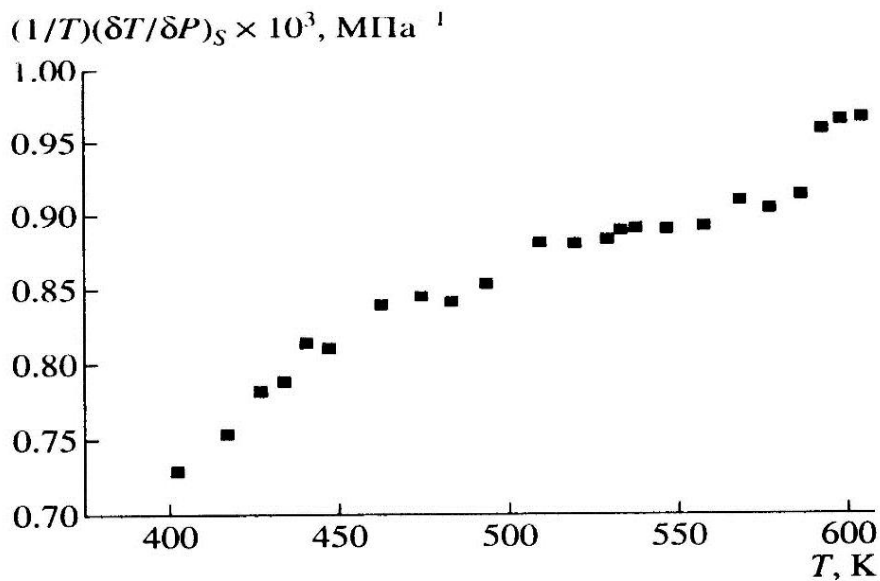


Рис.4. Температурная зависимость а.т.к.д. жидкого цезия [14]

На рис.4 можно наблюдать плавный рост температурной зависимости а.т.к.д. и скачок значения в районе 580К.

В работе Моденова А.А. представлен усовершенствованный метод измерения термодинамических параметров жидкостей с целью уточнения данных об а.т.к.д. жидкого цезия [11].

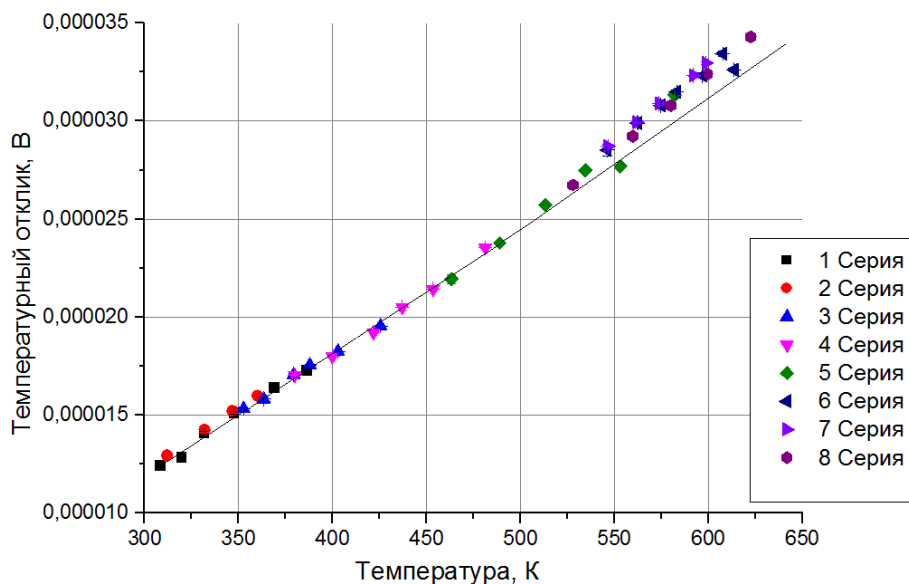


Рис.5. Зависимость температурного отклика от температуры.

Один из результатов работы Моденова А.А.[11] представлен на рис.5. На данном графике наблюдается довольно резкое изменение температурного отклика в районе 550К, с величиной отклонения 5-6%. Для подтверждения данной аномалии требуется серия аналогичных экспериментов с другими жидкими металлами.

1. Описание экспериментального метода

1.1. Усовершенствованная методика измерения а.т.к.д. проводящих жидкостей посредством использования упруготермического эффекта

Согласно формуле Томсона, адиабатический термический коэффициент давления $\gamma = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s$ равен отношению коэффициента теплового расширения к теплоемкости единицы объема: $\frac{\alpha_p}{C_p \rho}$. Соответственно, подвергая образец воздействию периодического давления получим:

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_s = \frac{\alpha_p}{C_p \rho} \quad (2),$$

где T – температура образца, ΔT – амплитуда температурных колебаний, вызванных переменным давлением, ΔP – амплитуда колебаний давления, α_p – коэффициента теплового расширения образца, C_p – удельная теплоемкость образца, ρ – плотность. Метод измерения а.т.к.д. посредством использования упруготермического эффекта, заключается в воздействии на образец периодическим давлением при условиях, близких к адиабатическим. Полученный периодический температурный сигнал с термопары, являющийся откликом на воздействие давлением, а также текущая температура экспериментального образца, служат источниками информации для вычисления значения а.т.к.д. [9].

В отличие от различных методов измерения теплофизических свойств жидкостей, включающих в себя периодическое воздействие на образец электрического тока [15], данный метод применим как для диэлектрических [16], так и для проводящих жидкостей. Ограничения в измерении того или иного жидкого образца зависят непосредственно только от диапазона температур, при которых образец может находиться в жидком состоянии.

2. Установка

2.1. Описание установки

Установка состоит из набора блоков: экспериментальная ячейка (рис.6), генератор периодического сигнала давления, система нагрева экспериментального образца, измерительный тракт, отвечающий за получение данных о сигнале давления, измерительный тракт, отвечающий за сбор данных сигнала температурного отклика.

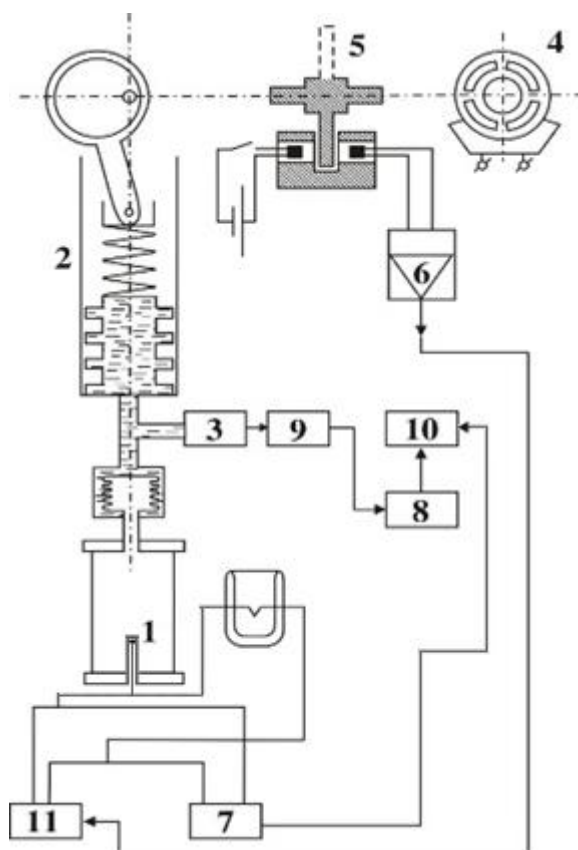


Рис.6. Схема установки для измерения а.т.к.д. жидких металлов. 1 – исследуемый образец, 2 – генератор периодической составляющей давления, 3 – датчик давления, 4 – электродвигатель, 5 – формирователь тактовых сигналов, 6 – усилитель сигнала фотодиода, 7 – цифровой микровольтметр Fluke8845, 8 – аналогово-цифровой преобразователь, 9 – усилитель Unipan, 10 – компьютер, 11 – прецизионный нановольтметр SR – 810.

2.2. Принцип работы установки

В основе эксперимента лежит метод, основанный на упруготермическом эффекте. Эффект проявляется при воздействии на образец периодическим давлением, которое, в свою очередь, порождает периодические колебания температуры.

Измеряемые величины: температура отнесения образца, амплитуда колебаний давления и амплитуда колебаний температуры.

2.3. Измерительная ячейка

Измерительная ячейка является цельной конструкцией из нержавеющей стали. Горячий спай термопары приварен с помощью точечной сварки к нижней части ячейки. Ранее используемая на кафедре ячейка представляла собой цилиндр, состоящий из двух половинок. Что касается термопары, ранее горячий спай находился в центре измерительной ячейки. Таким образом, ранее термопара находилась в изолированной капсуле, в данной же работе использовался незащищенный тип термопары (рис.7).

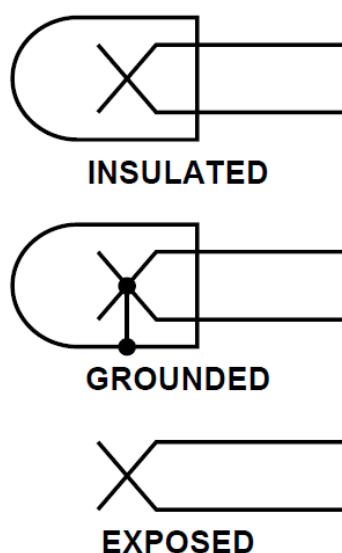


Рис.7. Типы соединений термопар

Используемая измерительная ячейка была рассчитана так, что способна выдержать нагрев до температур более 600 К.

2.4. Генератор периодического сигнала давления

Усовершенствовать установку удалось после того, как был разработан и создан генератор периодической составляющей давления новой конструкции. Его отличие от генератора прежней конструкции заключается в отсутствии циркуляции рабочей жидкости.

Генератор сделан таким образом, чтобы обеспечивать сигнал давления, имеющий в своем спектральном составе максимальный процент первой гармоники. В используемом генераторе величина первой гармоники составляет порядка 90 % (см. рис.8).

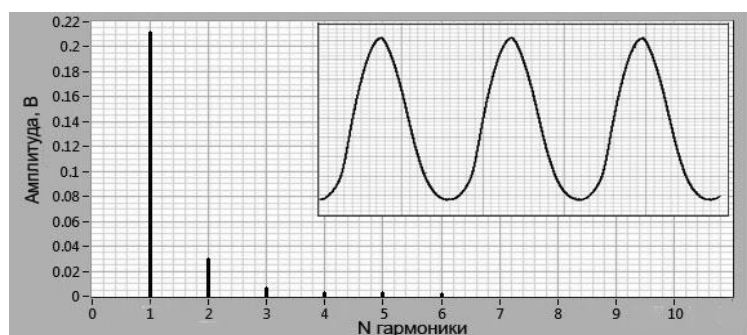


Рис.8. Спектральный состав сигнала с датчика давления

Сигнал создается посредством использования электродвигателя, редуктора и помпы (предусмотрена возможность выполнения измерений на частотах 2.5, 4.15 и 6.23 Гц).

Помпа обеспечивает воздействие периодическим давлением, которое передается рабочим веществом системы – касторовым маслом. Давление на рабочий образец, находящийся в экспериментальной ячейке, оказывается посредством сиффона. Специальное ответвление коммуникаций системы имеет на своем конце пьезодатчик давления, для организации съема экспериментальных данных касающихся амплитуды и спектрального состава периодического сигнала давления.

2.5.Схема формирования тактовых импульсов

Схема формирования тактовых импульсов совершенно необходима как для реализации метода двойной модуляции, так и для усовершенствования модуляционного метода измерений а.т.к.д. Для измерения а.т.к.д. использование данной схемы не является необходимым условием произведения измерений, так как вполне возможно получать усиленный сигнал температурного отклика посредством использования усилителей. Но данная организация измерительного тракта температурного отклика не может обеспечить значительную точность измерений без использования больших по амплитуде сигналов давления. В настоящей работе был применен метод синхронного усиления, требующий создания опорного сигнала на частоте целевого сигнала для обеспечения выделения последнего и отсеечения шума на частотах, не соответствующих частоте полезного сигнала, что позволяет измерять сигнал температурного отклика порядка сотен нановольт, а, следовательно, избавляет от необходимости использовать большие амплитуды колебаний давления. В процессе использования данной схемы и методики на выходе измерительного тракта мы получим постоянный сигнал температурного отклика. О применении данного метода в работе будет подробно рассказано ниже.

Рассматриваемая схема приведена на рис.9:

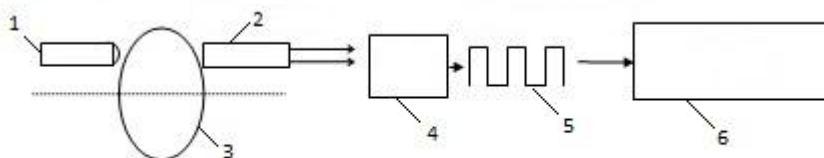


Рис.9. Схема формирования тактовых импульсов. 1 – Светодиод, 2 – Фотодиод, 3 – Металлический диск с прорезями, 4 – Схема усиления тактовых импульсов, 5 – Тактовые импульсы, 6 – Прецизионный нановольтметр SR-810.

Принцип работы описываемой схемы заключается в следующем: Частота вращения оси редуктора соответствует частоте сигнала давления так как система шестеренок, используемая в генераторе давления, имеет передаточный коэффициент 1:1. На оси редуктора находится металлический диск с прорезями (3), сделанными через равные промежутки. Сигнал от светодиода (1) попадает в фотодиод (2) в процессе совершения диском вращательного движения, что позволяет получать прямоугольные импульсы. Таким образом, количество сигналов в единицу времени соответствует частоте сигнала давления.

Далее, полученные таким образом прямоугольные импульсы попадают в схему усиления тактовых импульсов (4), где происходит усиление таковых для дальнейшей передачи в нановольтметр SR-810 (5), использующий данный сигнал в качестве опорного. Питание светодиодов (1) и фотодиодов (2) осуществляется непосредственно схемой (4).

Описываемая схема усиления тактовых импульсов отличается от использованной в работах по измерению коэффициента теплового расширения большей технологичностью (использовались SMD компоненты) и удобством.

2.6. Измерительный тракт сигнала температурного отклика и температуры образца

Эта часть экспериментальной установки претерпела изменения (рис.10): была проведена модернизация входной схемы разделения постоянной и переменной составляющих температурного сигнала образца.

Датчиком для измерения сигнала температурного отклика, а также температуры образца служит термопара, которая, как упоминалась выше, приварена к нижней части измерительной ячейки (1).

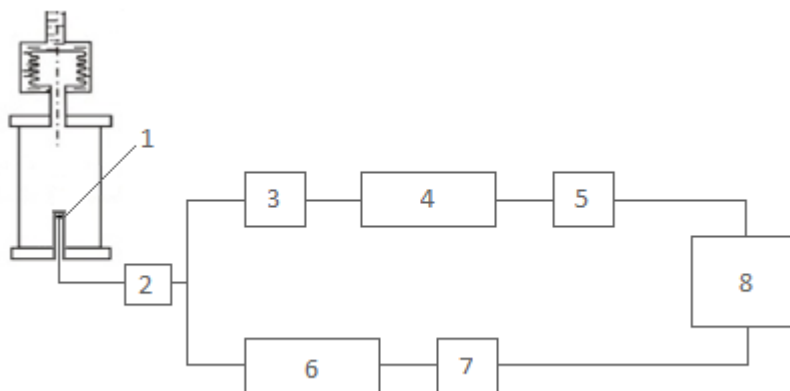


Рис.10. Блок-схема измерительного тракта температурного отклика и температуры образца. 1 – горячий спай термопары, 2 – схема разделения постоянного и переменного сигнала (суперконденсатор), 3 – предусилитель SR554, 4 – прецизионный нановольтметр SR 810, 5,7 – интерфейсы GPIB от фирмы “National Instruments”, 6 – микровольтметр Fluke 8845, 8 – компьютер.

Емкость пары полярных суперконденсаторов, соединенных таким образом, чтобы получить неполярный конденсатор, была уменьшена в 5 раз (до 1Ф каждый), с целью уменьшить время зарядки конденсатора и, соответственно, длительность одного измерения.

Затем постоянный сигнал поступает на микровольтметр Fluke 8845(6), сигнал с которого поступает непосредственно на компьютер через интерфейс GPIB (7).

Переменный же сигнал усиливается посредством предусилителя SR-554 (3), после чего попадает на вход нановольтметра SR-810(4), в котором посредством использования метода синхронного усиления из исходного сигнала температурного отклика и опорного сигнала получается постоянный сигнал, поступающий на компьютер также через интерфейс GPIB (5).

Отдельного рассмотрения заслуживает используемый при измерении сигнала температурного отклика метод синхронного усиления.

2.7.Метод синхронного усиления

Метод синхронного усиления позволяет измерять очень маленькие периодические сигналы даже в случае, если соотношение сигнал-шум весьма мало. Если мы имеем периодический сигнал:

$$V_{sig} \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \quad (3)$$

А также опорный сигнал прямоугольной формы иной амплитуды и фазы, синхронный усилитель, способен получить синусоидальный сигнал из прямоугольного (рис. 11). В этом случае сигнал будет выглядеть схожим образом с полезным, однако отличаться по амплитуде и частоте:

$$V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) \quad (4)$$

Затем сигнал будет усилен и перемножен посредством фазочувствительного детектора или перемножителя.

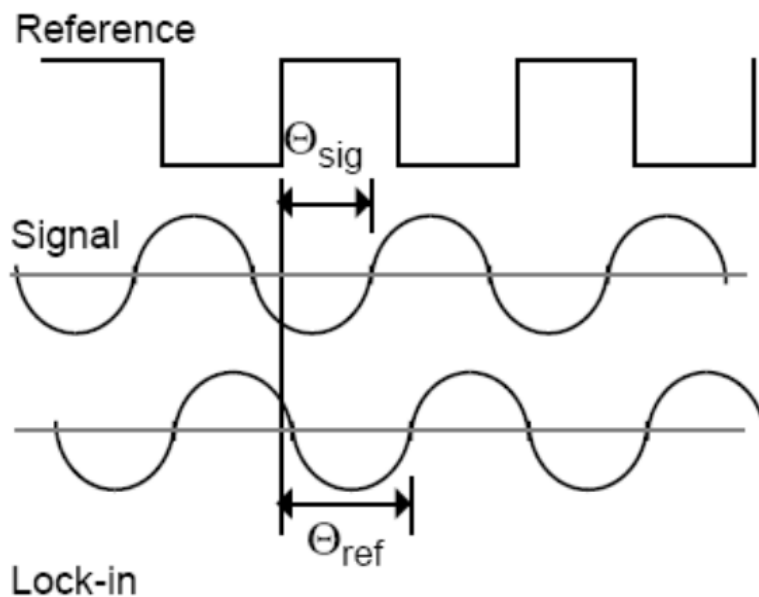


Рис. 11. Основной, опорный, и сигнал, получаемый из опорного

На выходе прибора мы получим следующий сигнал:

$$\begin{aligned} V_{psd} &= V_{sig} V_L \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) \\ &= 0.5 V_{sig} V_L \cos([\omega_r - \omega_L]t + \theta_{sig} - \theta_{ref}) \\ &\quad - 0.5 V_{sig} V_L \cos([\omega_r + \omega_L]t + \theta_{sig} + \theta_{ref}) \end{aligned} \quad (5)$$

Ввиду равенства частот основного и опорного сигнала данное выражение можно преобразовать к виду:

$$V_{psd} = 0.5 V_{sig} V_L * \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) . \quad (6)$$

Видно, что данный сигнал будет представлять собой постоянный сигнал, пропорциональный амплитудам целевого сигнала и опорного. Однако, чтобы полученный сигнал был постоянным, необходимо не только равенство частот опорного и целевого сигнала, но и постоянство разности фаз данных сигналов. Действительно, в случае изменяющейся со временем разности фаз, $\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$ будет зависеть от времени. При этом V_{psd} не будет постоянным сигналом. В нашем случае данное условие обеспечивается схемой, представленной на рис.8. Легко заметить, что в случае расхождения разности фаз на 90° мы не получим выходного сигнала. Однако, в нашем случае, фазы опорного и целевого сигналов близки друг к другу, соответственно мы можем получать на выходе сигнал, близкий к амплитуде усиленного входного сигнала температурного отклика.

2.8. Калибровка тракта температурного отклика

Для проверки линейности усилителя нановольтметра SR-810 была выполнена его калибровка. Поскольку измеряемый нановольтметром сигнал составлял доли микровольта, для проведения его калибровки необходимо было использовать делитель напряжения со степенью ослабления сигнала 1:800000, подаваемого от генератора стандартных сигналов АК ИП 4302/а (рис.12).

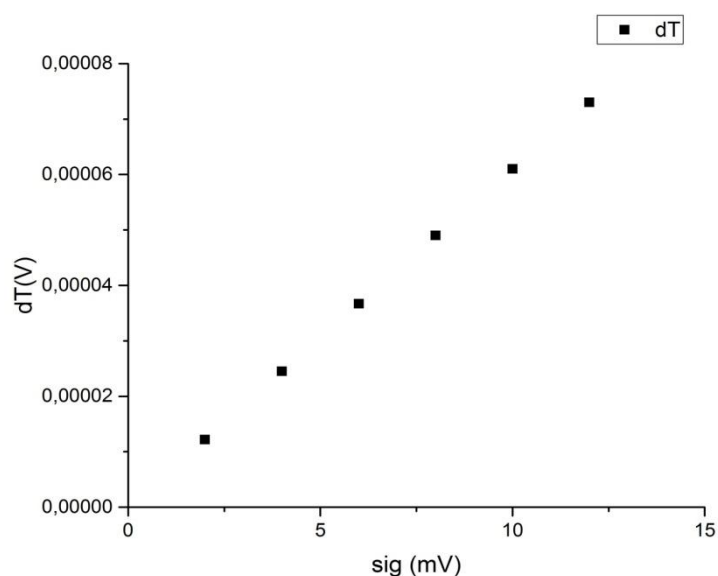


Рис.12. Калибровка усилителя (SR-810) с помощью генератора стандартных сигналов АК ИП 4302/а

2.9. Сбор данных температурного отклика и температуры образца

Данные температурного отклика и температуры образца записываются в соответствующий файл посредством программы, созданной с помощью среды Labview. Как было сказано выше, на компьютер данные поступают через интерфейсы GPIB. Получение и обработка данных через Labview возможна благодаря наличию библиотек этой среды для используемых семейств приборов, к которым относятся SR-810 и Fluke8845. Выходными данными для данного тракта являются всего два значения: постоянный сигнал температурного отклика SR810, и температура с Fluke. Ввиду необходимости измерения постоянного сигнала, не имеет смысла дополнительно обрабатывать сигнал или осуществлять Фурье-анализ сигнала (как это делается в случае сигнала давления).

2.10. Обработка экспериментальных данных

Следует отметить также процесс расчета адиабатического термического коэффициента давления из измеряемых величин. Измерительная программа на Labview производит осреднение получаемых данных за 4сек, затем записывает каждый набор данных в файл. Каждый набор данных представляет собой 6 значений: температуру образца, амплитуду сигнала температурного отклика, амплитуду сигнала давления, три гармоники сигнала давления. Ввиду одновременности фиксации трех параметров, в специальной программе обработки мы можем минимизировать погрешность измерений путем вычисления а.т.к.д. из каждого набора полученных экспериментальных данных, с последующим их осреднением. В результате, конечные значения отличаются сравнительно небольшой погрешностью не только благодаря использованию нановольтметра SR-810 (и, следовательно, маленькой погрешности измерений температурного отклика), но и из-за своевременной фиксации реакции температурного отклика на соответствующее воздействие давлением.

3.Измерения

3.1.Измерения амплитуды колебаний температуры

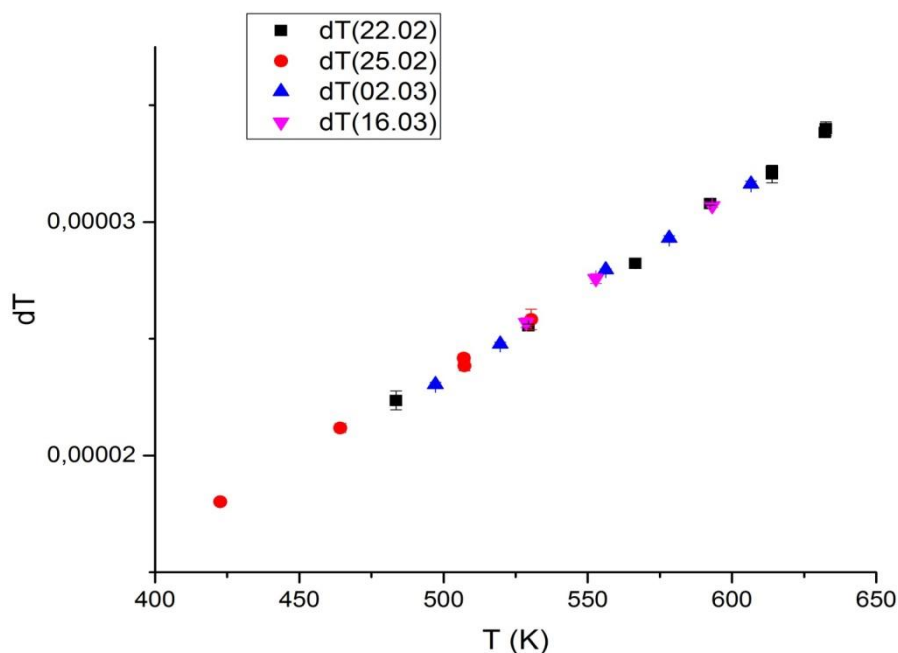


Рис.13. Зависимость температурного отклика от температуры образца

На рис.13 показана зависимость от температуры амплитуды температурных колебаний цезия. В среднем, случайная погрешность измерения в каждой точке менее 1% (см. приложение). Как видно из графика, экспериментальные точки, полученные в разных сериях, в перекрывающихся температурных интервалах достаточно хорошо согласуются, что может указывать на высокую стабильность и повторяемость амплитуды колебаний температуры во всём исследуемом интервале температур.

3.2. Исследование результатов амплитуды колебаний температуры

На рис.14 и на рис.15 проведены аппроксимации температурных колебаний линейной функцией и полиномом третьей степени. Точность аппроксимации полиномом степени незначительно превосходит точность линейной аппроксимации. По аппроксимации третьей степени заметно, что кривая слегка изогнута. По мере роста температуры кривая отклоняется вверх от линейной зависимости при температуре около 550К.

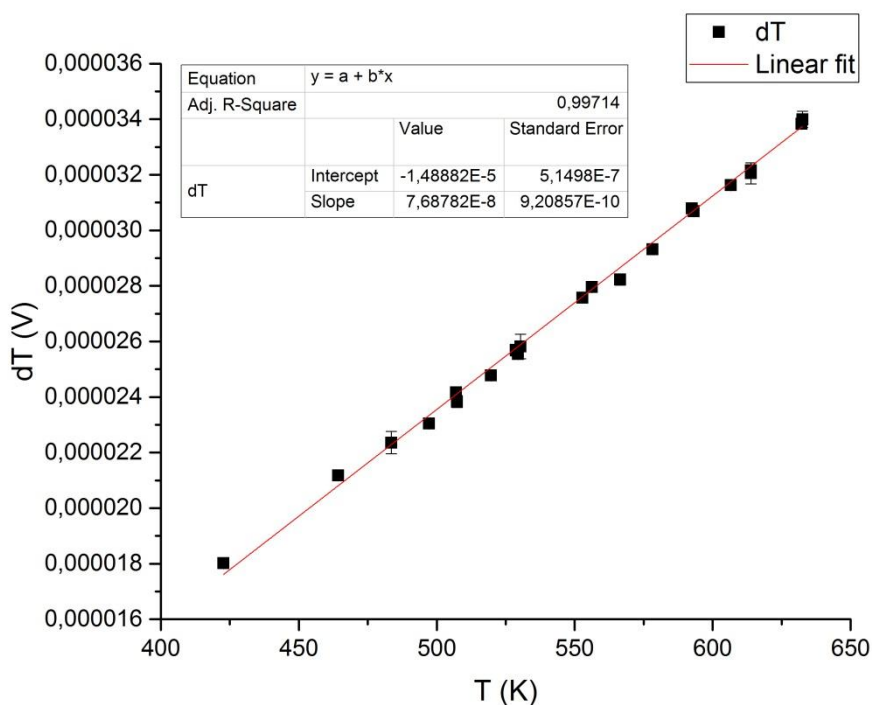


Рис.14. Линейная аппроксимация температурных колебаний.

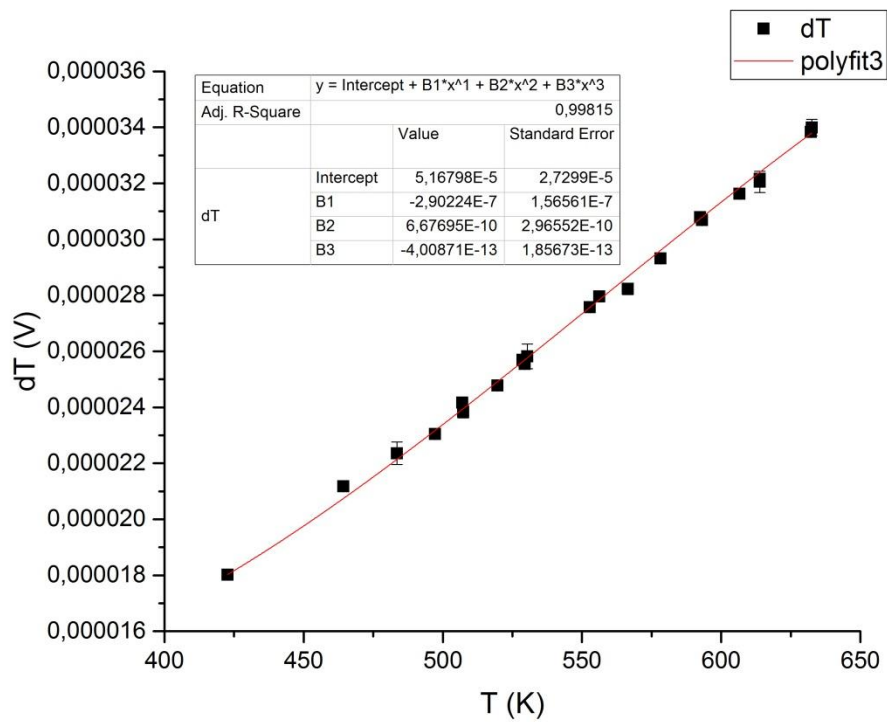


Рис.15. Аппроксимация температурных колебаний полиномом 3-ей степени

3.3. Сравнение результатов колебаний температуры различных экспериментов

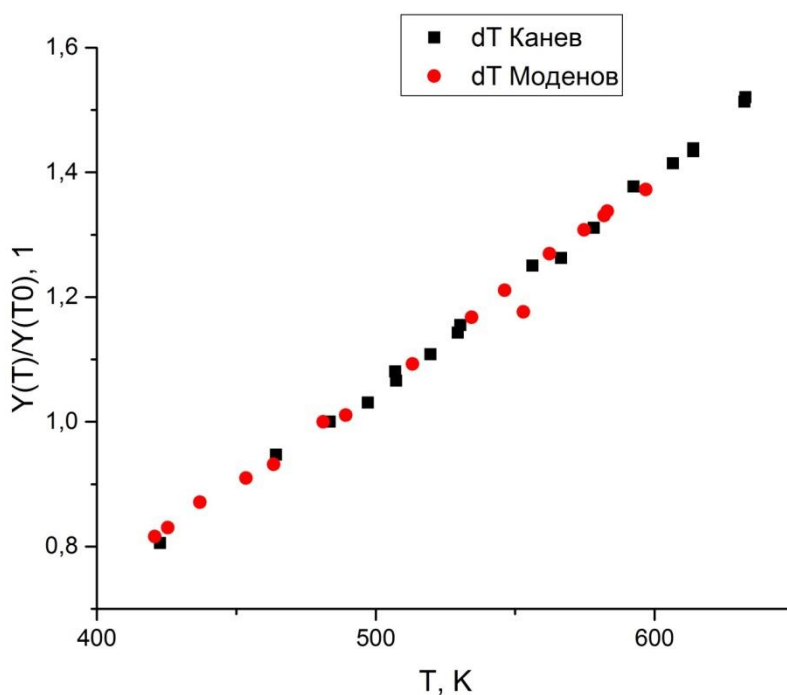


Рис.16. Сравнение результатов температурных колебаний температуры Моденова А.А. и Канева А.И. в относительных величинах

На рис.16 приведен график сравнения результатов температурных колебаний температуры в относительных величинах. Видно, что данный эксперимент с высокой степенью точности повторяет результаты эксперимента, выполненного Моденовым А.[11]. Из факта высокой степени повторяемости следует, что применяемая в данной работе усовершенствованная методика измерения а.т.к.д. хорошо проработана и задокументирована в виде инструкций по проведению эксперимента.

3.4. Измерения амплитуды колебаний давления

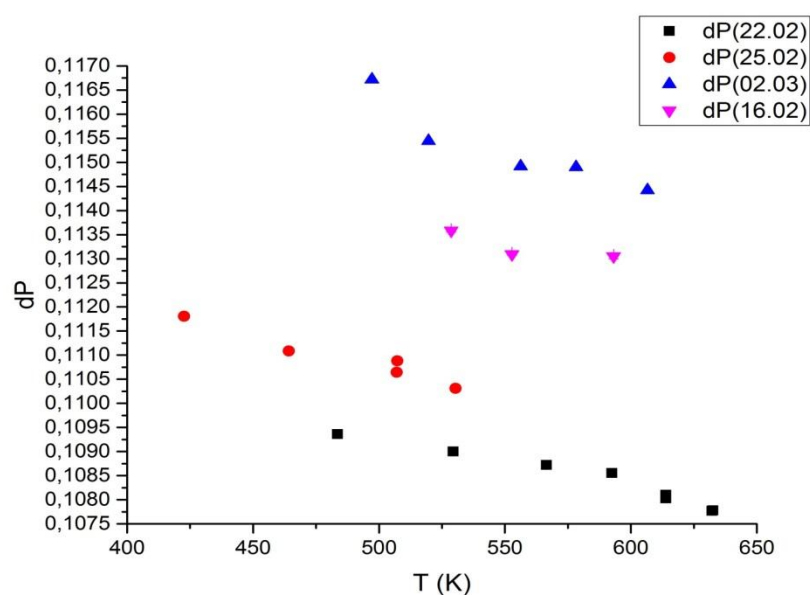


Рис.17. Зависимость амплитуды колебаний давления от температуры

На рис.17 представлена температурная зависимость амплитуды колебаний давления. Подтвердилась высокая точность измерений амплитуды колебаний давления в каждой отдельной температурной точке (среднеквадратичная погрешность 0.3-0.5%, см. табл.2 в приложении), но в разных сериях при схожих температурах наблюдается значительный разброс значений амплитуды колебаний давления (разность значений в среднем 5 %). По результатам экспериментов мы предполагаем, что данные об амплитуде колебаний давления, снятые с регистратора (Unipan 232B), следует признать сомнительными. Высокая степень воспроизводимости по амплитуде температурных колебаний косвенно свидетельствует о высокой стабильности амплитуды колебаний давлений, в противном случае, т.е. если бы амплитуда колебаний давления «гуляла», то «гуляла» бы и амплитуда колебания температуры. В то же время положение о высокой стабильности амплитуды колебаний давления требует тщательной проверки.

Заключение

Из полученных результатов наиболее важными для выводов представляются данные по температурной зависимости амплитуды температурных колебаний цезия. Эти данные можно рассматривать как предварительные, если иметь в виду окончательный вывод о характере аномалий, наблюдавшихся в окрестности температуры 600 К. Более полное, более обоснованное заключение может быть сделано лишь после того, как будут созданы условия для надёжного контроля за поведением аппаратуры, регистрирующей амплитуду колебаний давления. До этого момента можно сделать лишь предварительный вывод о том, что в целом по совокупности результатов экспериментов, проведенных разными методами, можно говорить о наличии признаков аномального поведения в цезии. Если ориентироваться на результаты, полученные в разных экспериментах, которые условно можно назвать данными по а.т.к.д., то, по формальным признакам, это похоже на структурный переход в твердых средах. Можно, допустим, сравнить это со структурным переходом в титанате стронция. Известен фазовый переход в титанате стронция при температуре 105 К., который сопровождается скачком коэффициента линейного расширения [17] порядка 12% и скачком теплоемкости [18] величиной около 1%.

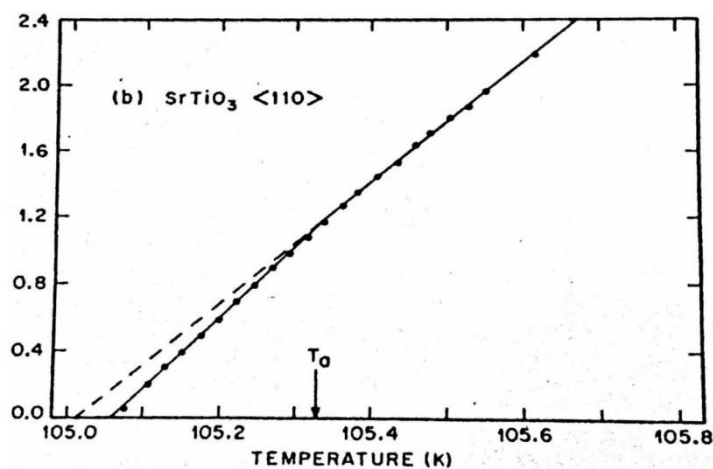


Рис. 18. Температурная зависимость коэффициента теплового расширения в титанате стронция [17].

Обращаясь к цезию, можно отметить довольно резкое изменение производной $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S$. Эта величина пропорциональна коэффициенту теплового расширения. Но при этом следует отметить и отличие от аномалий, наблюдаемых в титанате стронция. Дело в том, что в титанате стронция оба наблюдаемых скачка имеют отрицательный знак, в то время как резкий подъем названной производной в цезии имеет знак положительный. Но структурная перестройка в кристалле и в жидкости может быть совершенно различной. Если учесть, что термическое расширение в твердом теле и жидкости проявляется по-разному. В твердом теле термическое расширение проявляется в форме увеличения среднего межатомного расстояния с сохранением внутренней микроструктуры. В жидкости тепловое расширение происходит преимущественно благодаря изменению среднего координационного числа при довольно незначительном увеличении среднего межатомного расстояния. Поэтому природа аномального поведения цезия пока остается неясной. Неполная аналогия двух явлений может служить лишь частичной подсказкой. Помимо чисто методических усовершенствований, направленных на обеспечение стабильной работы регистратора амплитуды колебаний давления, естественной следует считать постановку задачи о проведении аналогичных измерений на других жидкометаллических образцах. Прежде всего такие измерения следует выполнить на рубидии.

Выводы

1. Исходя из сделанных предположений о стабильности амплитуды колебаний давления, определена термодинамическая производная $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S$ цезия в интервале температур 300-620К в среднем с погрешностью менее 1% (см. приложение).

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными Моденовым А.А., что свидетельствует о стабильности данных, получаемых на установке.

2. Следует отметить недостаточность полученных данных для подтверждения аномальных скачков производной $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S$. Желательна организация измерений производной $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S$ с достигнутой точностью на рубидиевых образцах с целью получения дополнительных данных о возможных аномалиях.

Список литературы

1. Васин М.Г., Ладьянов В.И. «Полиморфные переходы в однокомпонентных жидкостях: Часть I. Экспериментальные данные». Вестник Удмуртского университета. Физика. 2005. №4. С. 99 – 116.
2. Басин А.С., Соловьев А.Н., «Исследование плотности жидких свинца, цезия и галлия гамма-методом». ПМТФ, № 6, 1967, с. 83-87
3. Ю.Н. Шарыкин, В.И. Глазков, С.И. Сквородько, В.А. Соменков, и др., «Нейтроннографическое исследование структуры жидкого цезия», ДАН СССР 1979г., том 244, № 1, стр.72-82.
4. Астапкович Ф.Ю., Иолин Е.М., Козлов Е.Н., Николаев В.О., и др., «Нейтроннографические исследования измерений структуры в жидком рубидии», ДАН СССР, т.263, № 1, стр73-75.
5. A. G. Vorontsov, D. A. Kuts, «Structural changes of simple expanded liquids at high temperatures», Journal of Physics: Conference Series 98, 2008, 012004
6. Y. D. Fomin, E. N. Tsiok & V. N. Ryzhov. «Possible phase transition in liquid caesium at ambient pressure», Physics and Chemistry of Liquids (2018), DOI: 10.1080/00319104.2018.1509969
7. Филиппов Л.П., Стасенко В.А., Благодравов Л.А., «Измерение отношения коэффициента теплового расширения и изобарной теплоемкости единицы объема жидкости». Измерительная техника, 1984 г. №1, стр. 48-49
8. Филиппов Л.П., Благодравов Л.А., Стасенко В.А. «Авторское свидетельство № 1065752» (СССР способ измерения термического коэффициента давления жидкости) – опубл. в бюл. изобр. 1984 №1
9. Л.А. Благодравов, Ф. Модхен, «Измерения адиабатического термического коэффициента давления в периодическом режиме», Приборы и техника эксперимента, Москва, 1991г, №4, стр.167-170.

10. Blagonravov L.A., Skovorod`ko S.N., Krylov A.S., Orlov L.A., Alekseev V.A., Shpilrain E.E. «Phase transition in liquid cesium near 590 K». Journal of Non-Crystalline Solids. 277. (2000). 182-187.

11. Blagonravov L.A., Modenov A.A. Precise Measurements of Thermodynamic Parameters of Low-boiling Metallic Liquids // Journal of Physics: Conference Series. (2020) Institute of Physics (United Kingdom) V. 1385, N 012043, p.1-4.

12. Сковородько С.Н., «Экспериментальное исследование плотности и вязкости щелочных металлов и их сплавов при высоких температурах», Диссертация на соис. уч. степ. канд. тех. наук., Москва, 1980г., стр. 291.

13. Фомин В.А., «Исследования вязкости щелочных металлов», Диссертация на соис. уч. степ. канд. тех. наук., Москва 1966г., стр. 158

14. Благонравов Л.А., Сковородько С.Н., Орлов Л.А., Алексеев В.А. «Новые, уточненные данные об адиабатическом термическом коэффициенте давления жидкого цезия в области аномального поведения теплофизических свойств». ТВТ. (2000). Том 38. № 4. 566-572.

15. Филиппов Л.П. «Измерение теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева», Москва, Энергоатомиздат 1984 г.

16. Благонравов Л.А., Соболева А.В., Васильев Д.А., Карчевский О.О. «Применение гармонической модуляции в измерениях адиабатического термического коэффициента давления жидкостей». Измерительная техника, № 2, том 49, с. 1-3 (2013)

17. Golding B. Thermal Expansivity and Ultrasonic Propagation near the Structural Transition of SrTiO₃ // Physical Review Letters (1970) V. 25. N 20. P. 1439-1442.

18. Franke V., Hegenbarth E. Specific Heat Measurement of SrTiO₃ Near 110 K // Phys. Stat. Sol. (a). 1974. V. 25. № 1. P. K 17.

Приложение

T	dT	стдоткл(dT)	стдоткл(dT)
K	V	V	%
422,6609	1,80E-05	9,38E-08	0,52%
464,2445	2,12E-05	1,90E-07	0,90%
483,5478	2,24E-05	4,04E-07	1,81%
497,1473	2,30E-05	8,94E-08	0,39%
507,0099	2,42E-05	1,79E-07	0,74%
507,3168	2,38E-05	2,13E-07	0,90%
519,6752	2,48E-05	7,70E-08	0,31%
529,3925	2,55E-05	7,74E-08	0,30%
530,3946	2,58E-05	4,40E-07	1,70%
556,2556	2,80E-05	3,38E-08	0,12%
566,4751	2,82E-05	2,08E-07	0,74%
578,2074	2,93E-05	9,40E-08	0,32%
592,435	3,08E-05	6,52E-08	0,21%
606,5821	3,16E-05	1,27E-07	0,40%
613,8031	3,21E-05	3,76E-07	1,17%
613,8243	3,22E-05	2,04E-07	0,64%
632,1463	3,38E-05	6,75E-08	0,20%
632,5086	3,40E-05	2,98E-07	0,88%

Табл.1. Сводная таблица с данными по амплитуде температурных колебаний

T	dP	стдоткл(dP)	стдоткл(dP)
K	V	V	%
497,1473	0,116528	2,1679E-05	0,02
519,6751875	0,1154461	3,8393E-05	0,03
528,6480833	0,1135821	2,6213E-05	0,02
552,7891667	0,1130957	2,3777E-05	0,02
556,2556029	0,1149167	0,00012261	0,11
578,20735	0,1149033	0,00035304	0,31
593,0816406	0,1130591	5,2815E-05	0,05
606,582125	0,1144229	3,0447E-05	0,03

Табл.2. Сводная таблица с данными по амплитуде колебаний давления