

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ И
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Бакалаврская работа

«Применение метода двойной модуляции для
определения термодинамических производных
диэлектрических жидкостей»

Выполнил студент
404 группы
Гавриленко Олег Владиславович

подпись студента

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
Соболева Анна Владимировна

подпись научного руководителя

Допущен к защите «__» _____ 2020 г.
Зав. кафедрой
профессор Н.Н. Сысоев _____

подпись зав. кафедрой

Москва 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. Обзор методов определения коэффициента теплового расширения (к.т.р.) жидкостей..... | 4 |
| 1.1 Модуляционные методы | 4 |
| 1.2 Модуляционная дилатометрия | 4 |
| 1.3 Методы, основанные на регистрации тепловых потоков | 5 |
| 2. Метод измерения коэффициента теплового расширения α_p жидкостей с применением двойного модуляционного воздействия на образец | 7 |
| 2.1 Опыты, лежащие в основе метода двойной модуляции | 7 |
| 2.2 Метод двойной модуляции | 8 |
| 3. Описание установки для измерения к.т.р. жидкостей компенсационным методом | 11 |
| 3.1 Блок-схема установки..... | 11 |
| 3.2 Генератор периодической составляющей давления..... | 11 |
| 3.3 Измерительная ячейка и ячейка для регистрации давления | 11 |
| 3.4 Система управления электрическим током..... | 13 |
| 3.5 Устройство формирования тактовых импульсов | 13 |
| 3.6 Устройство формирования высокочастотного управляющего сигнала с применением широтно-импульсной модуляции | 14 |
| 3.7 Вспомогательный образец | 14 |
| 3.8 Измерительная цепь..... | 15 |
| 3.9 Особенности применения широтно-импульсной модуляции | 16 |
| 4. Измерение теплоемкости вспомогательного образца (графита)..... | 19 |
| 5. Анализ получаемого температурного отклика в условиях неидеальной компенсации. | 24 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 28 |
| ВЫВОДЫ | 28 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 29 |

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества был разработан метод измерения коэффициента теплового расширения (к.т.р.) проводящих жидкостей – $\alpha_p = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$, в котором предусматривалось использование двойной модуляции [1,2,3]. Один вид модуляции представлял собой квазигармонические колебания давления, воздействующего на жидкометаллический образец. Другой вид модуляции осуществлялся путем пропускания через образец переменного электрического тока, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний давления. При компенсации температурных откликов образца на оба модуляционных воздействия коэффициент теплового расширения определяется из отношения амплитуды колебаний мощности электрического тока к амплитуде колебаний давления. Опыт эксплуатации установки показал, что применение амплитудной модуляции электрического тока даже при использовании усилителя с синхронным детектором недостаточно избавляет от помех, уровень которых заметно снижает точность измерений. Описываемый метод представляет собой прямой способ определения к.т.р., в отличие от косвенного способа определения к.т.р., который осуществляется путём дифференцирования температурной зависимости плотности образца. Как следствие получаемый в прямом методе измерения к.т.р. температурный отклик является довольно слабым сигналом – десятые доли градуса или, в единицах напряжения, - нановольты. Поэтому были основания обратиться к другому методу модуляции, а именно, к широтно-импульсной модуляции. Однако прежде чем осуществить этот вид модуляции на установке, предназначенной для измерений к.т.р. на жидкометаллических образцах, было решено провести отработку методики в несколько облегчённом варианте. По двум причинам. Во-первых, как показал прежний опыт работы с жидкометаллическими образцами, большое значение в таких измерениях играет однородность температурного поля на длине рабочего участка измерительной ячейки. Это требует создания новой измерительной ячейки более сложной конструкции. Во-вторых, работа с жидкометаллическим образцом связана с использованием источников больших токов величиной в несколько сотен Ампер. Поэтому было сочтено целесообразным в качестве первого шага провести отработку методики на более простом варианте установки, в котором в качестве исследуемого образца используется непроводящая жидкость, а необходимый для реализации компенсационного метода дополнительный сигнал получается путем использования вспомогательного образца в виде графитового стержня.

Постановка задачи

Основной целью данной работы являлась разработка методики измерения коэффициента теплового расширения непроводящих жидкостей. Разрабатываемая методика нацелена на дальнейшее усовершенствование метода измерения к.т.р., в основе которого лежит применение двойной модуляции с использованием вспомогательного образца из проводящего материала. Проводилась подготовка установки для проведения температурных исследований к.т.р. дистиллированной воды при температурах близких к температуре замерзания.

1. Обзор методов определения коэффициента теплового расширения (к.т.р.) жидкостей

1.1 Модуляционные методы

Модуляционные методы, применяемые в теплофизических исследованиях, основываются на возбуждении в образце температурных колебаний посредством введения в него энергии, поступающей таким образом, чтобы выделяемая мощность имела периодический характер. В таком случае теплоемкость образца будет задавать амплитуду соответствующих колебаний. Модуляционная калориметрия позволяет измерять теплофизические параметры, используя именно эту особенность.

1.2 Модуляционная дилатометрия

В 1960-х гг. модуляционные методы стали применяться также и в дилатометрии (изучении теплового расширения). В том числе и для измерения коэффициента теплового расширения в узком температурном интервале. В эксперименте проводится фиксация изменений длины образца, вызванных возбужденными в нем температурными колебаниями. Этот способ позволяет исключить из рассмотрения нерегулярные изменения длины, обусловленные внешними возмущениями. Таким образом, удастся решить главные проблемы, возникающие в традиционной дилатометрии при высоких температурах.

Модуляционная дилатометрия была впервые предложена Крафтмахером и Черемисиной [4]. Она применялась в изучении теплового расширения чистых металлов и сплавов. Измерения проводились на проволочных образцах, которые нагревали переменным током или

постоянным током с небольшой переменной составляющей, рис.1. Частота температурных колебаний составляла несколько десятков герц. Верхний конец образца закреплялся, а нижний натягивался грузом или пружиной. С помощью оптической системы изображение груза проецировалось на катод фотоумножителя, переменное напряжение на выходе которого было пропорционально амплитуде колебаний длины образца.

В другом варианте модуляционной дилатометрии проволоочный образец состоит из двух частей, соединенных вместе: исследуемый образец и эталонный с известным коэффициентом линейного расширения [5]. Значение к.т.р исследуемого материала определяется с использованием значений термодинамических параметров эталонного образца. Модуляционная дилатометрия позволяет также измерять параметры объемных образцов,

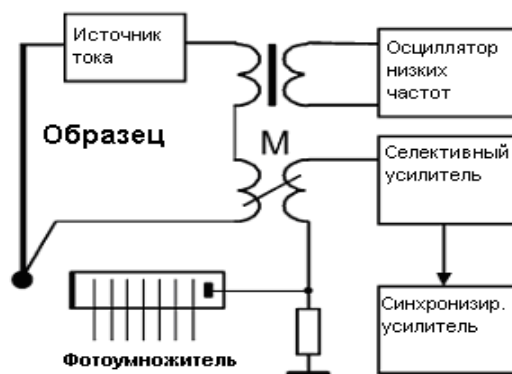


Рисунок 1 - Измерения коэффициента теплового расширения методом модуляционной дилатометрии.

таких как стержни и ленты. При этом чувствительность измерений удастся повысить используя интерферометрический вариант с использованием образца в виде толстой проволоки или прутка [6]. Стоит добавить, что эти методы применимы не только для проводящих образцов, но и, например, для сделанных из полимерных материалов [7].

1.3 Методы, основанные на регистрации тепловых потоков

В рассмотренных случаях допускается использование в качестве исследуемого образца только твердых тел. Для измерения к.т.р. проводящих жидкостей необходимо использовать другие способы. К ним можно отнести относительно новые методы нахождения теплоемкости, к.т.р и сжимаемости, основанные на регистрации тепловых потоков [17,18]. Сущность метода измерения заключается в косвенном определении исследуемых термодинамических параметров по значениям теплового потока

Q, который исходит от ячейки и действует на термоэлектрические батареи, и по изменению температуры исследуемой жидкости при различных изменениях давления.

2. Метод измерения коэффициента теплового расширения α_p жидкостей с применением двойного модуляционного воздействия на образец

2.1 Опыты, лежащие в основе метода двойной модуляции

Прежде чем перейти к изложению метода двойной модуляции, которому посвящена данная работа, необходимо рассмотреть те теплофизические исследования, которые привели к его созданию. Основоположником в области модуляционных методов измерений термодинамических параметров является Орсо Марио Корбино [8,9], который в 1910 использовал электрический ток для периодического нагревания проволочных образцов с целью определения их теплоемкости.

В 1927 Диксон и Роудбаш [10] осуществили эксперимент, в котором температурный отклик в образце возникал в результате действия упруготермического эффекта после включения в систему установки в адиабатических условиях веса 5-метрового столба ртути. В ходе проведения опыта ими была измерена величина, называемая адиабатическим термическим коэффициентом давления (а.т.к.д.):

$$y = \left(\frac{1}{T}\right) \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S, \quad (1)$$

где T – температура, p – давление, S – энтропия.

Дальнейшее развитие методики измерения а.т.к.д. осуществлялось в 80-ых годах научной группой Филиппова Л. П [11]. Было предложено использовать некоторый эталонный образец с известным значением а.т.к.д. Это позволило бы получать относительные измерения без использования абсолютной температурной шкалы при регистрации температурного отклика. В этом методе, так же как и в эксперименте Диксона и Роудбаша, использовался импульсный перепад давления, что сильно ограничивало чувствительность приборов измерений. Поэтому в конце 80-ых было решено усовершенствовать методику путем применения периодического изменения давления для измерения а.т.к.д жидко-металлических образцов [12]. Таким образом, модуляционный метод измерения а.т.к.д. в сущности является аналогом метода периодического нагрева, используемого в измерениях теплоемкости. Из достоинств этого метода следует отметить возможность осреднения накопленных сигналов в ходе многократного повторения воздействия на объект исследования. А также использование селективных методов регистрации сигналов, благодаря которым удалось значительно

повысить чувствительность измерительной системы. В силу того, что выражение для а.т.к.д содержит в себе другой термодинамический параметр, коэффициент теплового расширения (к.т.р), эта методика может быть также использована для установления его температурной зависимости в случае проводящих жидкостей.

2.2 Метод двойной модуляции

Накопленный опыт в работе с модуляционными методами привел к возникновению идеи создания новой методики, основанной на одновременном пропускании через образец электрического тока и воздействии на него периодически изменяющимся давлением. В случае когда оба воздействия имеют синусоидальную форму, компенсация получаемых температурных откликов позволяет с помощью несложных расчетов выразить к.т.р. Выражение для температурного отклика в образце в условиях близких к адиабатическим можно получить из метода нахождения теплоемкости с применением периодического нагрева [13] :

$$C_p = \frac{W_{\sim}}{\Delta T m \omega}, \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{W_{\sim}}{C_p m \omega}. \quad (3)$$

где C_p - удельная теплоемкость образца, W_{\sim} - амплитуда колебаний мощности переменного тока, ΔT - температурный отклик, m – масса нагреваемого образца, ω - круговая частота колебаний мощности.

Если принять во внимание, что реальные процессы являются неидеально адиабатическими, то формуле (3) можно придать более общий вид:

$$\Delta T = \frac{W_{\sim}}{C_p m \omega} g_1. \quad (4)$$

где g_1 – безразмерный множитель, являющийся поправкой на неадиабатичность процесса [2].

Для периодического воздействия переменным давлением на образец при малых колебаниях температуры можем записать выражение для а.т.к.д. , используя формулу Томпсона:

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_s = \frac{\alpha_p}{C_p \cdot \rho}. \quad (5)$$

Так же учитывая неидеальность адиабатических условий в измерительной ячейке путем введения поправочного множителя g_2 , для температурного отклика имеем:

$$\Delta T = \frac{T \alpha_p}{C_p \rho} P_{\sim} g_2. \quad (6)$$

P_{\sim} - амплитуда колебаний давления. Приравнивая температурные отклики, получим:

$$\frac{W_{\sim}}{C_p m \omega} g_1 = \frac{T \alpha_p}{C_p \rho} P_{\sim} g_2. \quad (7)$$

Отсюда определяем α_p :

$$\alpha_p = \frac{W_{\sim} \rho}{T m \omega P_{\sim}} \frac{g_1}{g_2} = \frac{W_{\sim}}{T V \omega P_{\sim}} \frac{g_1}{g_2}. \quad (8)$$

Учитывая, что и переменное давление и джоулев периодический нагрев представляют собой объемные источники тепловыделения, а тепловые потери происходят через одну боковую поверхность ячейки, в первом приближении можно считать, что $g_1 = g_2$.

Если добавить в систему установки вспомогательный проводник и периодически воздействовать на жидкость давлением, а на твердый образец электрическим током, добиваясь компенсации их откликов, тогда метод двойной модуляции можно применять и для измерения к.т.р непроводящей жидкости. Температурные колебания, вызванные изменением давления в ячейке с жидким образцом можно аналогичным образом представить в виде:

$$\Delta T_1 = \frac{T_1 \alpha_{p_1}}{C_{p_1} \rho_1} P_{\sim} . \quad (9)$$

Для температурных колебаний в проводнике можно записать:

$$\Delta T_2 = \frac{W_{\sim}}{C_{p_2} \rho_2 V_2 \omega} . \quad (10)$$

Приравнивая ΔT_1 и ΔT_2 , получим:

$$\alpha_p = \frac{W_{\sim} C_{p_1} \rho_1}{T C_{p_2} \rho_2 V_2 \omega P_{\sim}} . \quad (11)$$

Таким образом, можно измерять коэффициент теплового расширения диэлектрических жидкостей, если воспользоваться справочными данными и вычислить величину дополнительного множителя $\frac{C_{p_1} \rho_1}{C_{p_2} \rho_2}$.

3. Описание установки для измерения к.т.р. жидкостей компенсационным методом

3.1 Блок-схема установки

Установка была смонтирована на основе установки для измерения а.т.к.д. жидкого цезия [14]. От прежней установки были использованы генератор периодической составляющей давления и трасса, соединяющая его с измерительными ячейками. Установка состоит из следующих блоков: измерительная ячейка, ячейка для регистрации переменной составляющей давления, генератор периодической составляющей давления, генератор переменного электрического воздействия, измерительная цепь, см. рис. 2.

3.2 Генератор периодической составляющей давления

Генератор установки состоит из электрического двигателя, собственного внутреннего редуктора и поршня. Редуктор устроен так, чтобы частота вращения вала на выходе была равна 2,27 Гц. При помощи кардана вал редуктора соединяется с поршнем. Поршень вызывает колебания давления в системе. В качестве рабочего вещества в системе применяется касторовое масло. С помощью трассы и сильфонов давление передается на ячейки.

3.3 Измерительная ячейка и ячейка для регистрации давления

Обе ячейки имеют одинаковую конструкцию. Цилиндр изготовлен из нержавеющей стали и состоит из двух половинок. Половинки цилиндра стягиваются фланцами с помощью трех шпилек. Между половинками цилиндра расположены две прокладки из фторопласта. Во избежание пластической деформации прокладок снаружи на стальной цилиндр надевается ограничительное кольцо на уровне прокладок. Для этого в металлических кольцах были сделаны отверстия. Тефлоновые прокладки делались двойными, чтобы между ними закрепить термопару в определенном положении и избежать касания кольца. Королек термопары расположен в центре ячейки. Измерительная ячейка была заполнена дистиллированной водой, а ячейка для измерения переменной составляющей давления – изооктаном. Ячейки присоединены к сильфону.

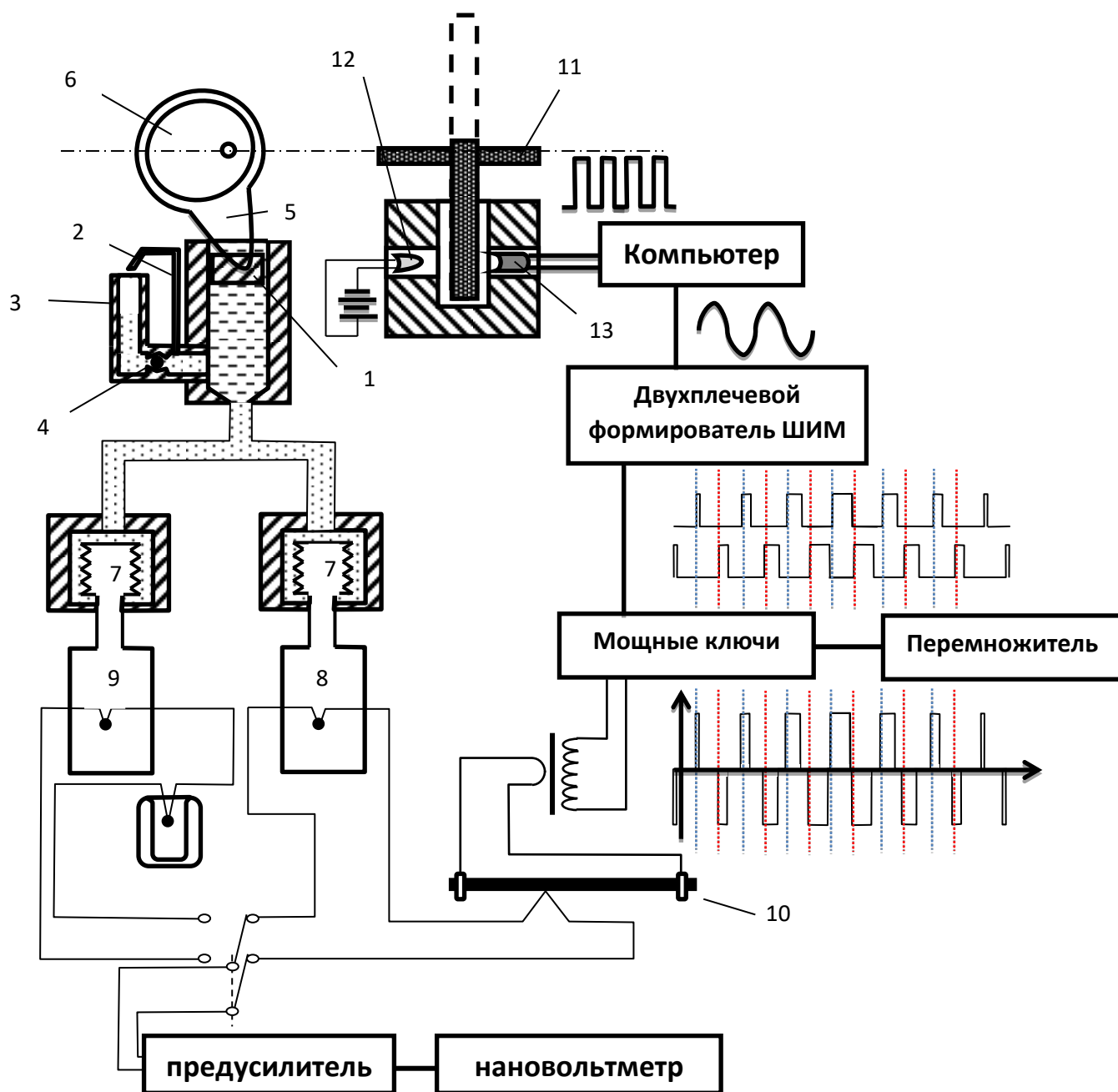


Рисунок 2 - Схема установки для измерения к.т.р. диэлектрической жидкости. 1.поршень, 2. капилляр, 3.резервуар с маслом, 4.шариковый клапан, 5,6. эксцентрик, 7. сильфон, 8.измерительная ячейка, 9. ячейка для регистрации переменной составляющей давления, 10. графитовый стержень, 11. вал редуктора с пластиковым диском, 12. светодиод, 13. фотодиод

3.4 Система управления электрическим током

Необходимо, чтобы периодические изменения мощности электрического тока осуществлялись синхронно с колебаниями давления, тогда и температурные колебания от обоих воздействий будут происходить синхронно. Использование синусоидального тока с частотой ω в системе приводит к колебаниям мощности на двух частотах ω , 2ω и появлению электромагнитной наводки на термопаре с частотой ω . Однако, как показали пробные эксперименты, отделить нужный температурный сигнал от наводки в этом случае невозможно. Поэтому было решено в системе управления электрическим током использовать метод широтно-импульсной модуляции, при котором колебания тока происходят с частотой 5-10 кГц, а колебания температурного отклика - на частоте 2,27 Гц. Таким образом, становится возможным с помощью дополнительных фильтров устранить высокочастотный сигнал, вызванный электромагнитной наводкой на термопаре.

3.5 Устройство формирования тактовых импульсов

На одной оси с поршнем находится редуктор. Редуктор представляет собой две параллельные оси, соединенные системой шестеренок. Система шестеренок имеет передаточный коэффициент 1:1. Частота вращения осей 2,27 Гц, что соответствует частоте изменения давления. На одной из осей находится металлический диск с окном влоборота диска. При помощи лампочки и фотодиода формируется последовательность прямоугольных импульсов с частотой следования 1 импульс на один оборот диска. На другой оси насажен пластиковый прозрачный диск с покрашенными секторами.

При помощи светодиода и фотодиода формируется последовательность прямоугольных импульсов с частотой следования 98 импульсов на один оборот диска. Амплитуда тактовых импульсов составила 60 mV, а после транзисторного каскада амплитуда составила 4,5 V. Данные последовательности поступают на компьютер. С помощью специальной программы амплитуда каждого импульса устанавливается так, чтобы на выходе форма сигнала была синусом с периодом, равным одному обороту диска. Такое дискретное преобразование осуществляется путем деления гармонической функции на 98 частей. Задача второй последовательности импульсов с другой частотой следования компенсировать основной сигнал в случае пропуска одного или двух импульсов основной последовательности. В программе компьютера также есть возможность менять разность фазы между модулирующим сигналом и периодическим изменением давления.

3.6 Устройство формирования высокочастотного управляющего сигнала с применением широтно-импульсной модуляции

Низкочастотный сигнал с компьютера подается на первый вход компаратора КС544. На второй вход компаратора поступает высокочастотный пилообразный сигнал с RC-генератора. На выходе компаратора мы имеем последовательность прямоугольных импульсов, имеющих фиксированную амплитуду, при этом длительность импульсов меняется в соответствии с законом изменения амплитуды модулирующего сигнала. После этого сигнал с промодулированной скважностью разделяется на два. Оба сигнала получают путем исключения каждого четного и нечетного периода последовательности соответственно. Таким образом, импульсы одной последовательности опережают импульсы другой последовательности на период высокочастотного сигнала. Затем обе последовательности поступают на канал управления силовыми ключами. Ключи подают поочередно на выходной понижающий трансформатор положительное и отрицательное напряжение в соответствии с управляющими последовательностями. С выхода трансформатора усиленный сигнал подается на графитовый стержень. Таким образом, при применении широтно-импульсной модуляции мощность электрического тока на ячейке изменяется по гармоническому закону на частоте 2,27 Гц, прямая электрическая наводка на термопаре имеет частоту 10 кГц. Следовательно, прямую электрическую наводку можно легко отделить от измеряемого сигнала. Так как прямая электрическая наводка имеет большую амплитуду, то между фильтром постоянной составляющей и концами термопары устанавливается высокочастотный фильтр. Необходимо отметить, что применяемая ранее схема ШИМ была однополюсной и не развивала достаточной мощности для работы на чистом графите, вместо него применялся стержень из графитового композита с сечением 1мм^2 .

3.7 Вспомогательный образец

В качестве вспомогательного образца используется стержень в виде составной конструкции из графитовых пластин. Две одинаковые пластины прямоугольного сечения, расположены параллельно и плотно прижаты друг к другу по всей длине. Концы пластин омеднены и пропаяны. Между пластинами по центру зажат королек термопары. Электрическая изоляция термопары от графита выполнена с помощью тонких пластинок слюды. Толщина пластинок $h = 0.015\text{мм}$ (см. рис 3). Суммарное сечение стержня составляет $S=25\text{ мм}^2$, измеренное сопротивление $R = 0,0749\text{ Ом}$. Малая толщина пластинок обеспечивает хорошую термическую связь термопары со

стержнем при электрической изоляции. Расположение термопары внутри составной конструкции делает лучше условия адиабатичности термопары по сравнению с предыдущим вариантом комбинированного образца, где термопара крепилась на поверхности стержня.

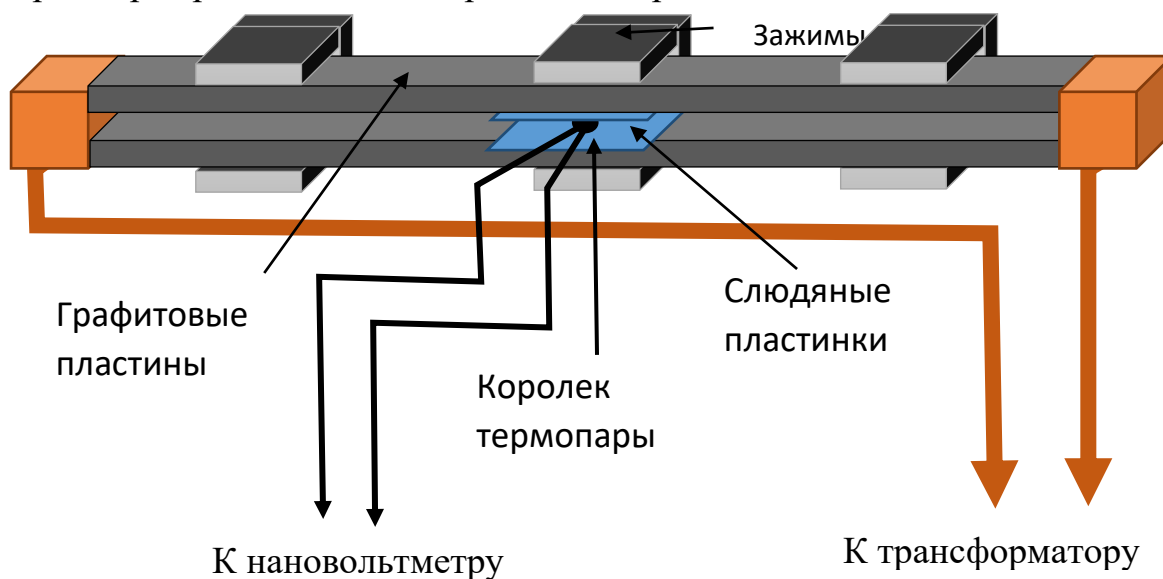


Рисунок 3 - Крепление термопары к графитовому стержню.

3.8 Измерительная цепь

Измерительная цепь включает (см. рис. 2) в себя селективный нановольтметр “УНИПАН 233В” с предусилителем 232.7 и трансформатором 232.7.4, фильтр постоянной составляющей и перемножитель. Сигнал на выходе перемножителя пропорционален произведению сигналов на его двух входах, которые подключены один параллельно вспомогательному образцу, а другой - последовательно.

Для получения наиболее достоверных результатов планируется использовать четырехканальный цифровой осциллограф с частотой оцифровки 100 кГц. Программная часть измерительного комплекса разрабатывается в среде LabVIEW. LabVIEW - среда программирования, созданная специально для автоматизации производства и автоматизации экспериментов. Она наиболее удобна для сбора, классификации, а также анализа и обработки экспериментальных результатов. Кроме этого среда удобна наличием мощного математического аппарата, а также возможностью взаимодействия с любым измерительным и управляющим оборудованием, имеющим сопряжение с компьютером. На рис. 4 представлен примерный вид блок-схемы программы, предназначенной для одновременной записи

трех сигналов, приходящих на АЦП USB-6210. Кроме того в программе реализована возможность фильтрации шумов и сетевых наводок, а также предусмотрен фурье-анализ всех сигналов.

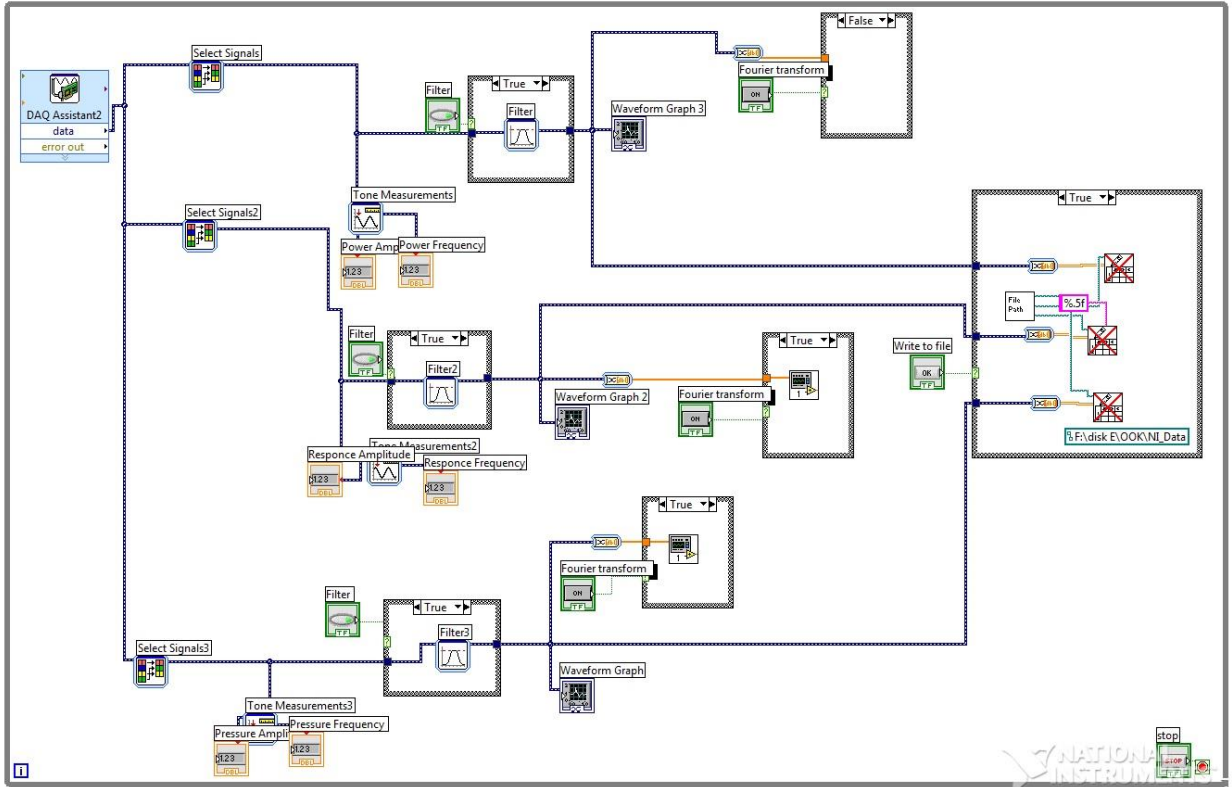


Рисунок 4 - Блок-схема программы для обработки и записи сигналов

3.9 Особенности применения широтно-импульсной модуляции

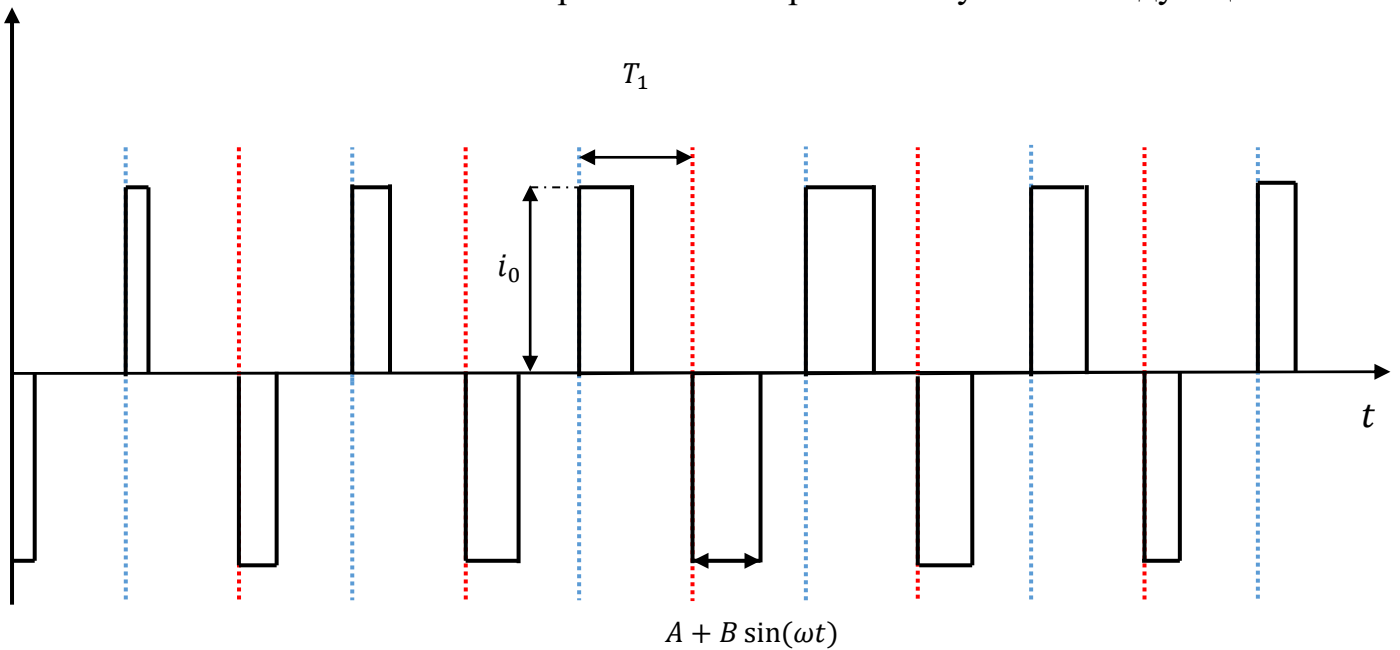


Рисунок 5 - Сигнал, подаваемый на графитовый стержень

Расчет мощности, выделяющейся на графитовом стержня в результате применения двухплечевой широтно-импульсной модуляции (рис. 5), можно провести на основе модели одноплечевой модуляции, если заменить двухполюсовую последовательность импульсов на однополюсовую с периодом T_1 [15]. Такой переход возможен в силу того факта, что мощность зависит от квадрата тока.

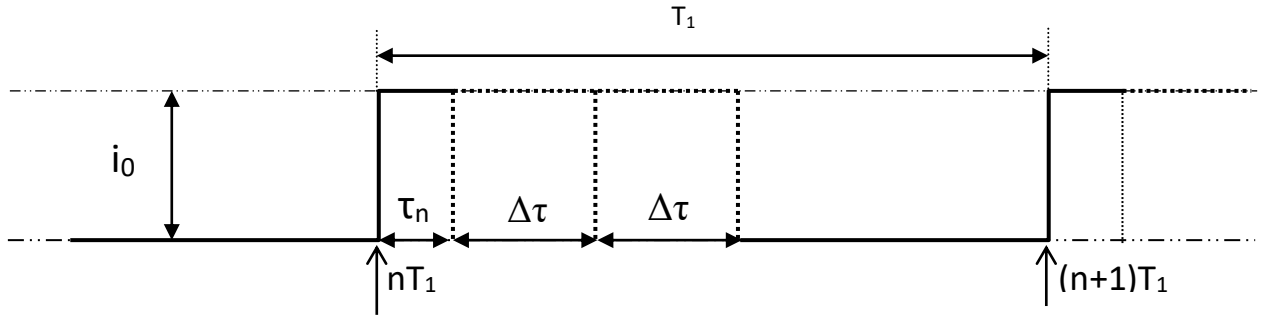


Рисунок 6 - Одноплечевая широтно-импульсная модуляция.

Для того чтобы измерить мощность электрического тока за период, нам необходимо определить среднее напряжение и ток. Произведем расчет средней величины напряжения, подаваемого на ячейку за один период частотно модулируемого напряжения.

При использовании одноплечевой широтно-импульсной модуляции электрический ток, протекающий через образец, представляет собой неограниченную последовательность прямоугольных импульсов с периодом T_1 , рис. 6. Мгновенное значение тока можно определить выражением:

$$i(t) = i_0 \left\{ \sum_{n=0} \left[1(t - nT_1) - 1 \left(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t))) \right) \right] \right\}. \quad (12)$$

Здесь $1(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$ дискретная функция Хевисайда. Для получения мгновенной мощности необходимо возвести выражение (12) в квадрат. Используя свойства функции $1(x)$, получим:

$$\begin{aligned} i(t)^2 &= i_0^2 \left\{ \sum_{n=0} \left[1(t - nT_1) - 1 \left(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t))) \right) \right] \right\}^2 = \\ &= i_0^2 \left\{ \sum_{n=0} \left[1(t - nT_1) - 1 \left(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t))) \right) \right] \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

Найдем далее среднее значение мощности на интервале времени от nT_1 до $(n+1)T_1$, т.е. на n -ом периоде:

$$\overline{i_n^2} = i_0^2 \frac{1}{T_1} \int_{nT_1}^{(n+1)T_1} \left[1(t - nT_1) - 1\left(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t)))\right) \right] dt.$$

(14) Учтем, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$, при этом $T \gg T_1$. Поэтому можем положить в подынтегральном выражении $\sin(\omega t) \cong \sin(\omega nT_1)$. Тогда (14) примет вид:

$$\begin{aligned} \overline{i_n^2} &= i_0^2 \frac{1}{T_1} \left[T_1 - \left(T_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t))) \right) \right] = \\ &= i_0^2 \left\{ \frac{1}{T_1} (\tau_n + \Delta\tau) + \frac{\Delta\tau}{T_1} \sin(\omega nT_1) \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Первое слагаемое в фигурных скобках соответствует постоянной составляющей мощности. Второе слагаемое соответствует переменной составляющей, причем колебания мощности, как видно, происходят на частоте колебаний электрического тока. Вторая гармоника отсутствует. В этом заключается особенность широтно-импульсной модуляции.

Принимая во внимание снова неравенство $T \gg T_1$ и то, что $\sin(\omega t) \cong \sin(\omega nT_1)$, выражение (15) с учетом только переменной составляющей можно переписать:

$$\overline{i_{\approx}^2}(t) = i_0^2 \frac{\Delta\tau}{T_1} \sin(\omega t). \quad (16)$$

4. Измерение теплоемкости вспомогательного образца (графита)

Как было отмечено ранее, для нахождения к.т.р. непроводящих жидкостей необходимо иметь значения теплоемкости вспомогательного образца в измеряемом температурном диапазоне. Система установки позволяет получить их экспериментально с использованием формулы (2) путем измерения амплитуды температурного отклика с графитового стержня при различных значениях амплитуды гармонических колебаний мощности. В связи с этим работа с установкой была начата с проверки системы модуляции мощности на графитом стержне. Для этого с помощью нановольтметра измерялся температурный отклик в вспомогательном образце при различных значениях фазы получаемого сигнала (Рис. 7).

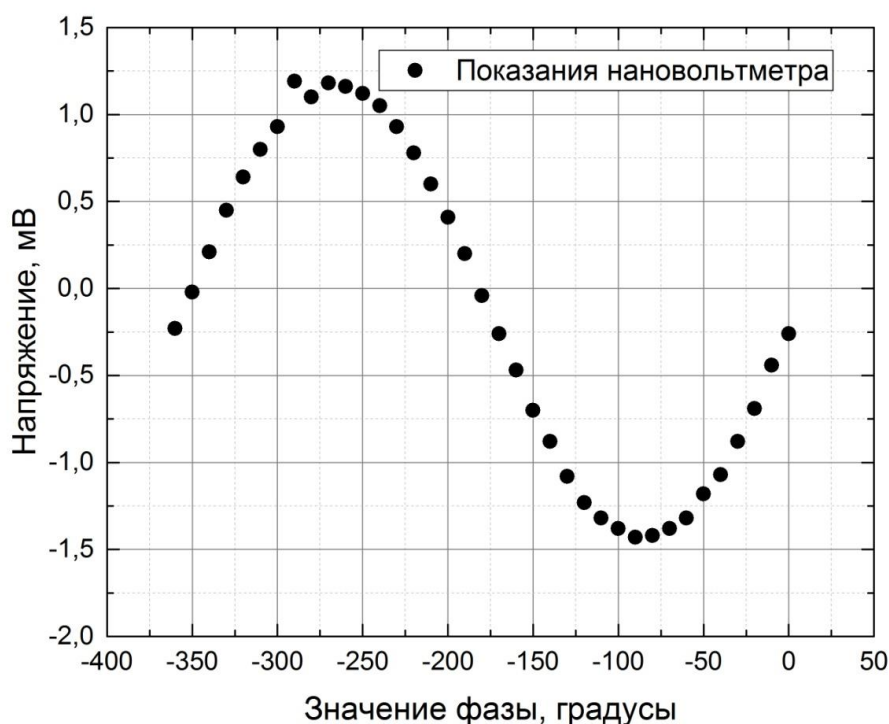


Рисунок 7 - Амплитудно-фазовая характеристика модуляции мощности.

Гармонический анализ полученных данных (рис.8) показал, что амплитуды второй и третьей гармонических составляющих не превышают 0,7% от основного тона. Это позволяет сделать вывод, что полученный сигнал с высокой степенью точности является синусоидальным.

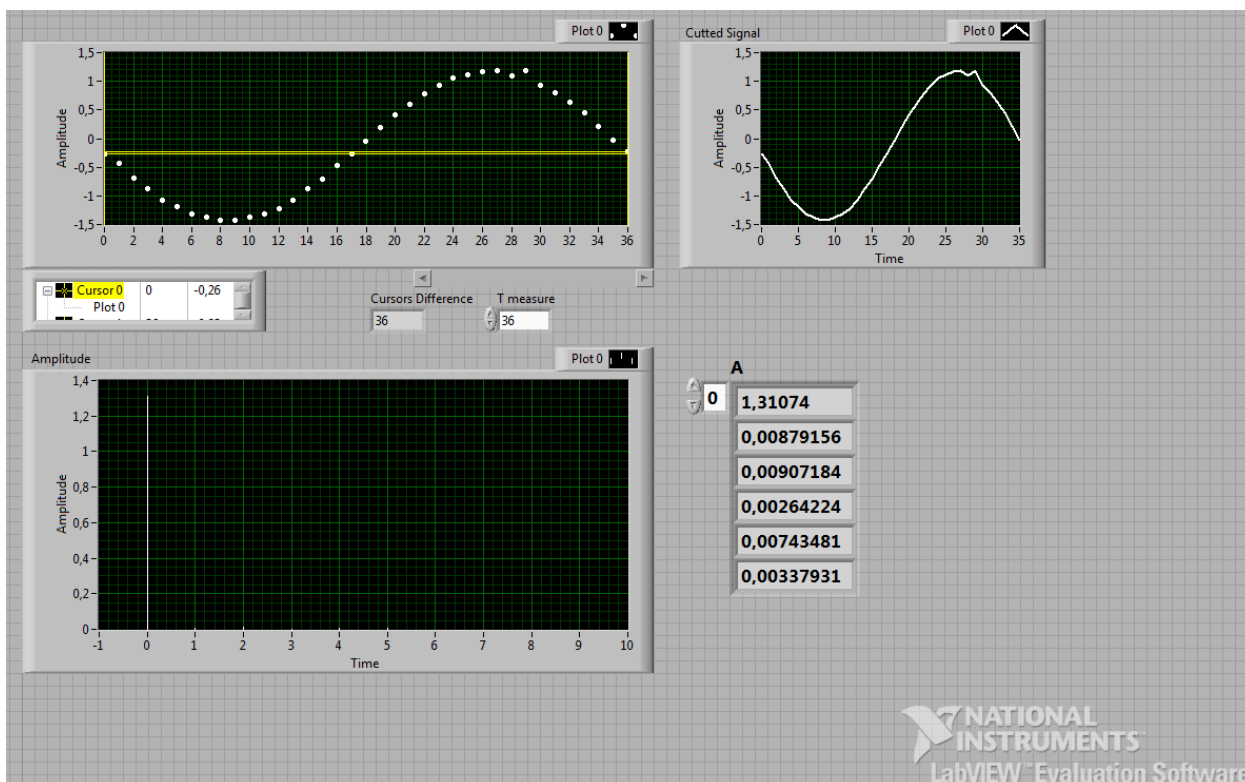


Рисунок 8 - Гармонический анализ амплитудно-фазовой характеристики модуляции мощности. А – амплитуды первых шести гармонических составляющих сигнала, мВ

Так как температурный отклик прямо пропорционален мощности электрического тока (3), то можно считать, что мощность изменяется в полном соответствии с управляющим сигналом (в нашем случае синусом), и система модуляции работает корректно. Также необходимо отметить сдвиг амплитудно-фазовой характеристики относительно нуля.

Для проведения измерений было необходимо проградуировать нановольтметр uiran-233. Нановольтметр подключался к генератору АК ИП 4302/А через делитель с параметрами 860 кОм : 1 Ом. Частота генератора 1 кГц. С нановольтметра снимались показания при различных значениях напряжения на его входе (расчетные показания нановольтметра). При этом показания считывались как со стрелочного датчика на самом нановольтметре, так и с цифрового на электронном тестере, подключенном к нему. Результаты градуировки различных шкал нановольтметра представлены ниже (Рис. 9).

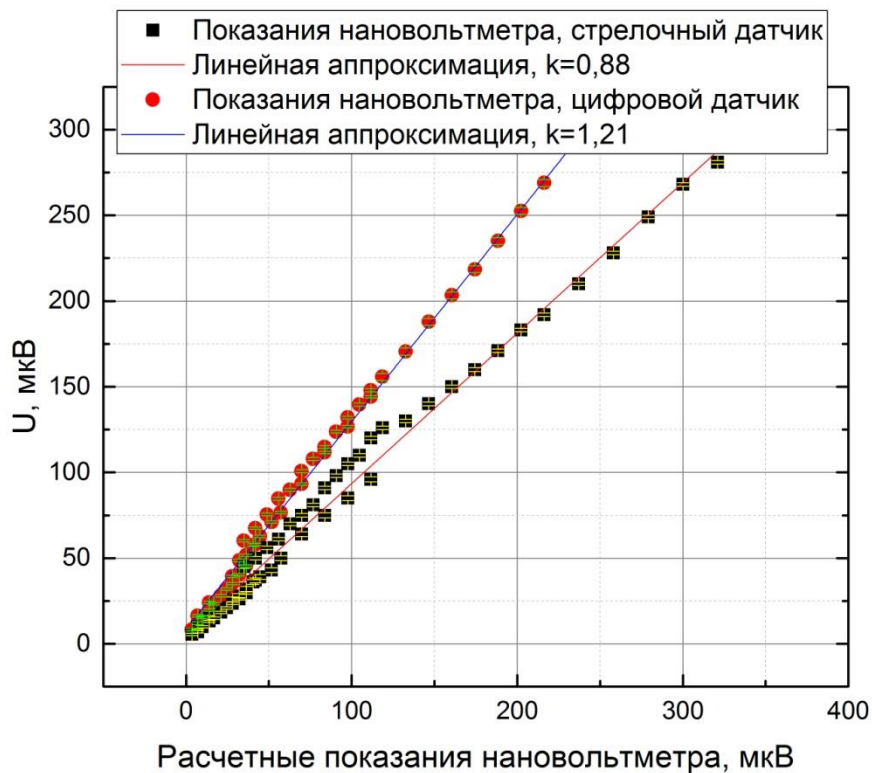


Рисунок 9 - Зависимость показаний нановольтметра от расчётных значений.

На графике 9 объединены измерения для трех шкал чувствительности прибора. Как видно из графика зависимости хорошо аппроксимируется линейной функцией. Различие в показаниях цифрового и стрелочного датчика может быть объяснено тем, что прибор имеет погрешность, на что уже указывал сдвиг относительно нуля амплитудно-фазовой характеристики на предыдущем графике (рис 7).

Следующим этапом в измерении теплоемкости была калибровка мощности. Она заключалась в построении зависимости показаний перемножителя от мощности электрического тока протекающего через графитовый стержень. Калибровка осуществлялась в двух основных режимах при отсутствии и наличии модуляции. Было проведено несколько серий измерений. В обоих случаях мощность изменялась двумя способами. Первый способ - изменение напряжения, подаваемого на образец. Второй - в случае отсутствия модуляции, изменение длительности импульса высокочастотной последовательности при постоянном напряжении. При модуляции-изменение амплитуды модуляции (скважности).

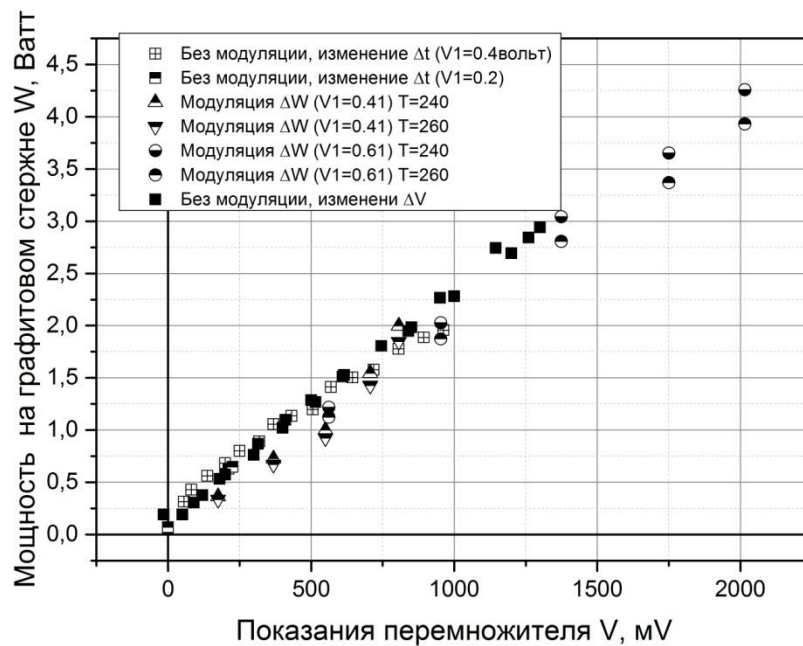


Рисунок 10 - Зависимость мощности от показаний перемножителя.

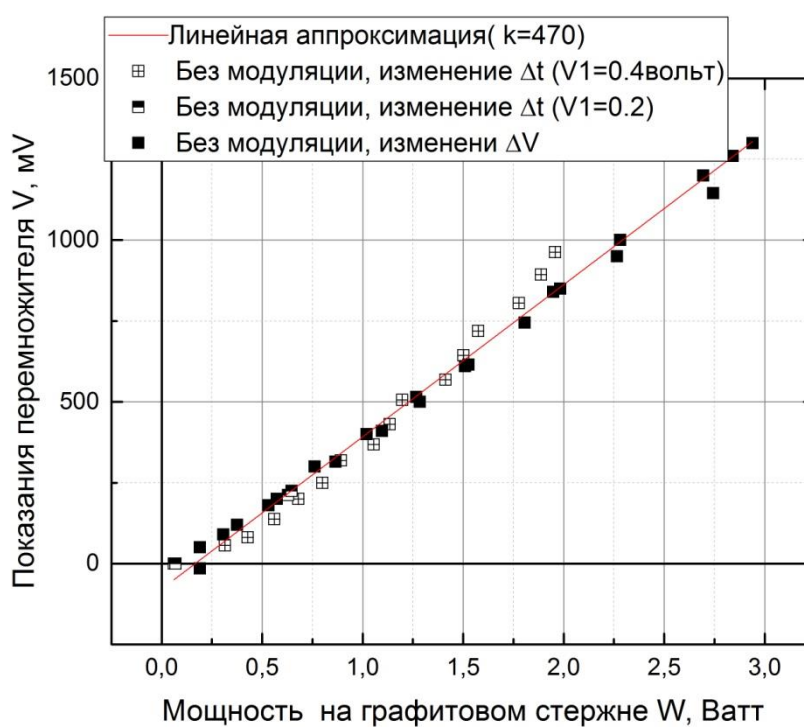


Рисунок 11 - Калибровка мощности без модуляции.

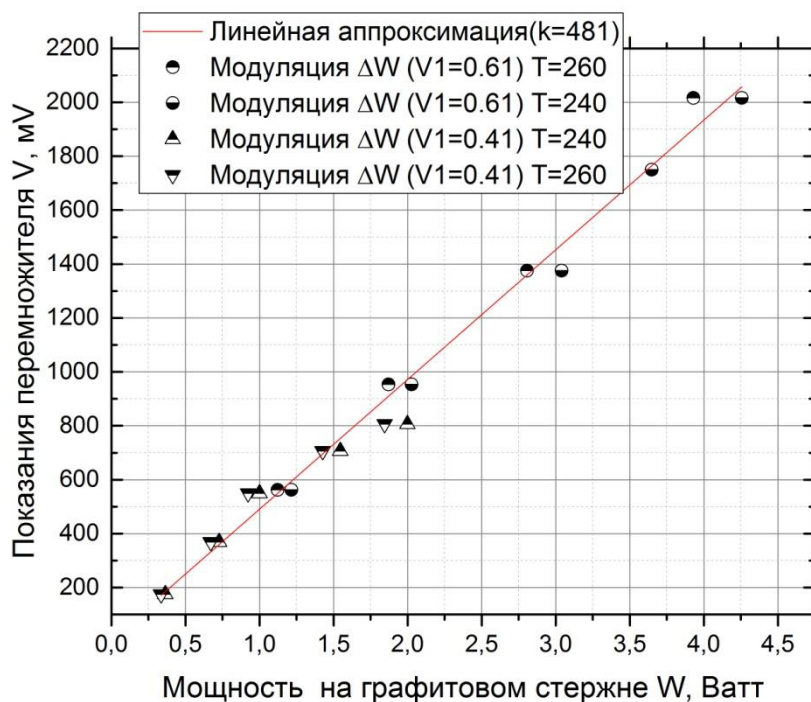


Рисунок 12 - Калибровка мощности с модуляцией.

Результаты представлены на рис. 10-12. Как видно из графиков все калибровки линейны и имеют удовлетворительное согласие. Лучшее согласие получено в отсутствие модуляции, в то время как при модуляции наблюдается более сильный разброс. Это можно объяснить тем, что моменты максимума и минимума ловились в ручном режиме на запоминающем осциллографе. Ввиду человеческого фактора не всегда регистрировались максимум и минимум сигнала, что в свою очередь занижает показания мощности. Избавиться от этого поможет внедрение системы оцифровки и программного комплекса LabVIEW. Однако с высокой вероятностью можно утверждать, что ожидаемые результаты совпадут с результатами калибровки, полученными при отсутствии модуляции.

5. Анализ получаемого температурного отклика в условиях неидеальной компенсации

По ряду причин было принято решение провести теоретические расчеты получаемых температурных откликов в условиях реального эксперимента и с учетом неидеальности механизмов установки. В описанном выше методе предполагалось, что в результате модуляции температурный отклик от воздействия давлением и электрическим током имеют синусоидальную форму. Однако в реальных условиях система генерации синусоидального давления имеет люфты в своей механической части. В итоге температурный отклик от периодически изменяющегося давления отличается от синусоидального и, помимо основной частоты 2,27 кГц, имеет другие гармоники. Сигнал, получаемый в результате модуляции мощности, предполагается же синусоидальным. Кроме того при компенсации присутствует неточность в установке разности фаз между сигналами и амплитуды. Эти факторы ведут к неидеальности в компенсации сигналов. Оценить погрешность можно, если принять отклик от давления в виде:

$$\Delta T_1 = 0,95 \sin(x + \varphi_1) + 0,095 \sin(2x + \varphi_2),$$

а отклик от мощности:

$$\Delta T_2 = \sin(x + \pi).$$

Рассмотрим температурные отклики и результат их компенсации при различных значениях φ_1, φ_2 :

- a) $\varphi_1 = 0^\circ, \varphi_2 = 0^\circ$
- b) $\varphi_1 = 5^\circ, \varphi_2 = 1^\circ$
- c) $\varphi_1 = 10^\circ, \varphi_2 = 5^\circ$
- d) $\varphi_1 = 15^\circ, \varphi_2 = 15^\circ$

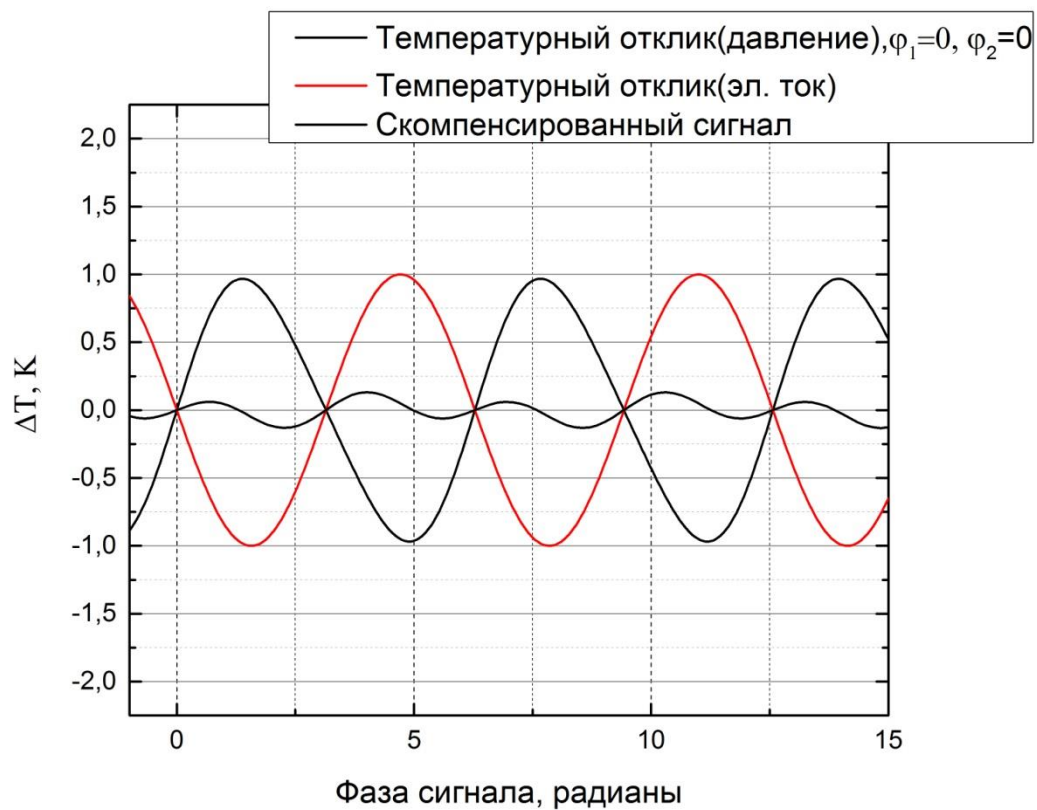


Рисунок 13 - а)

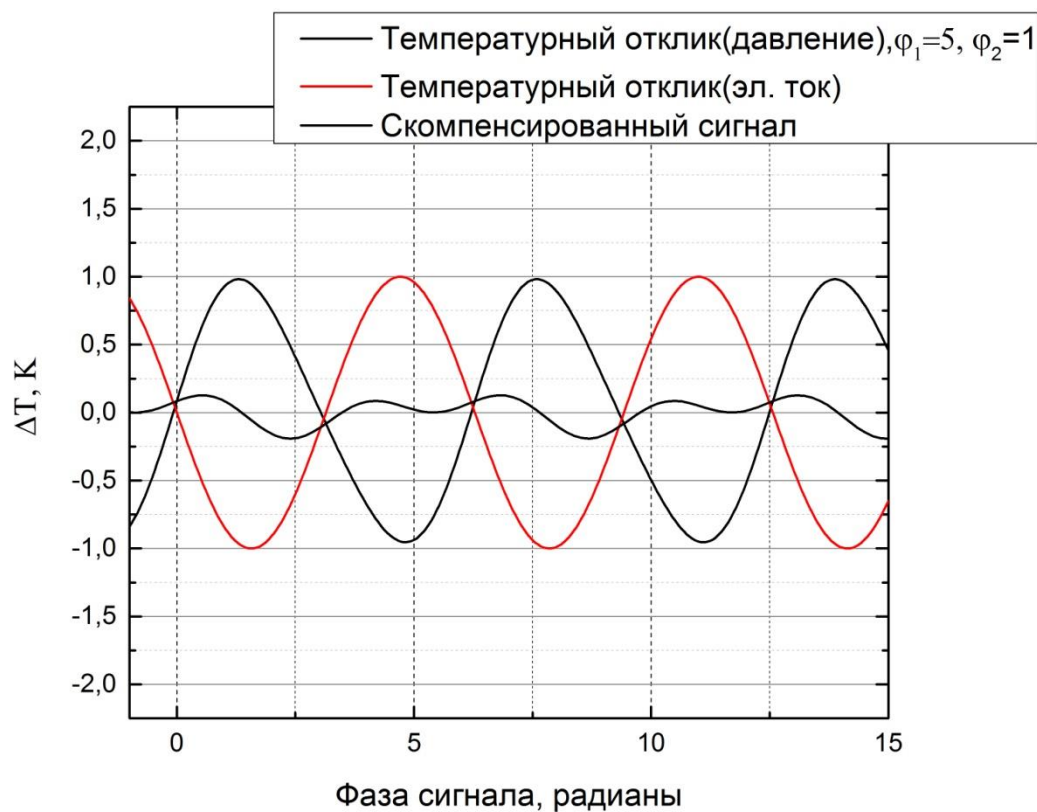


Рисунок 14 - б)

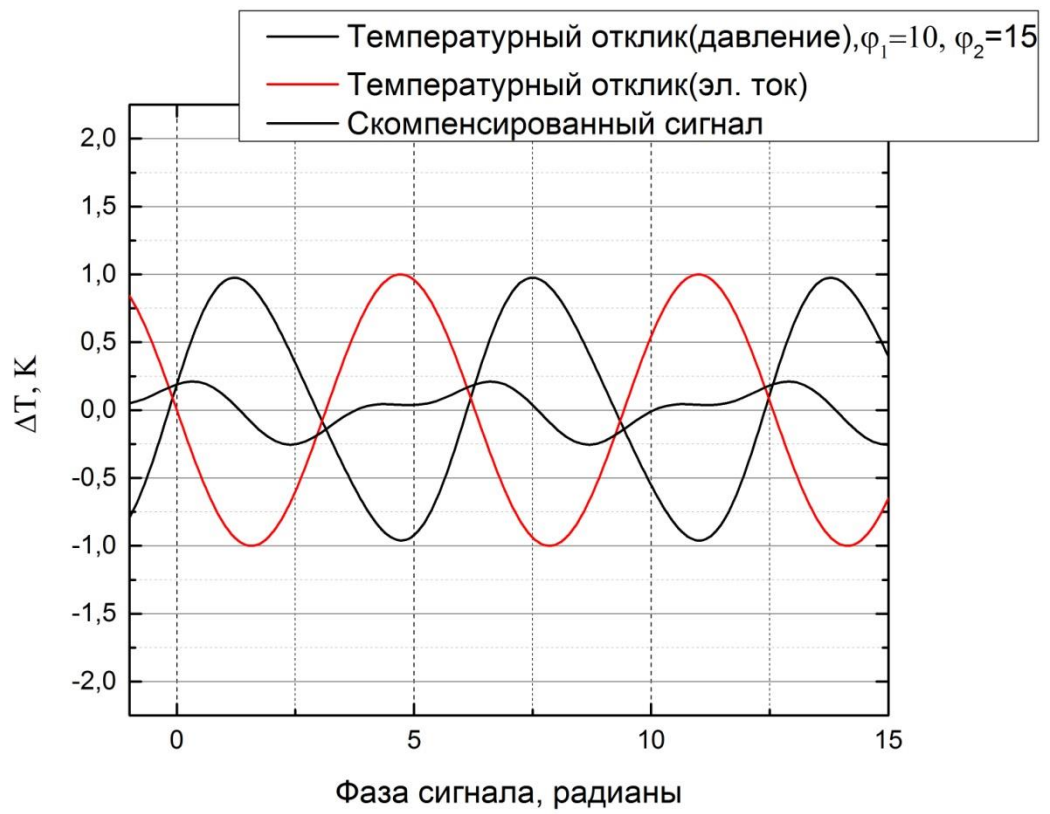


Рисунок 15 - с)

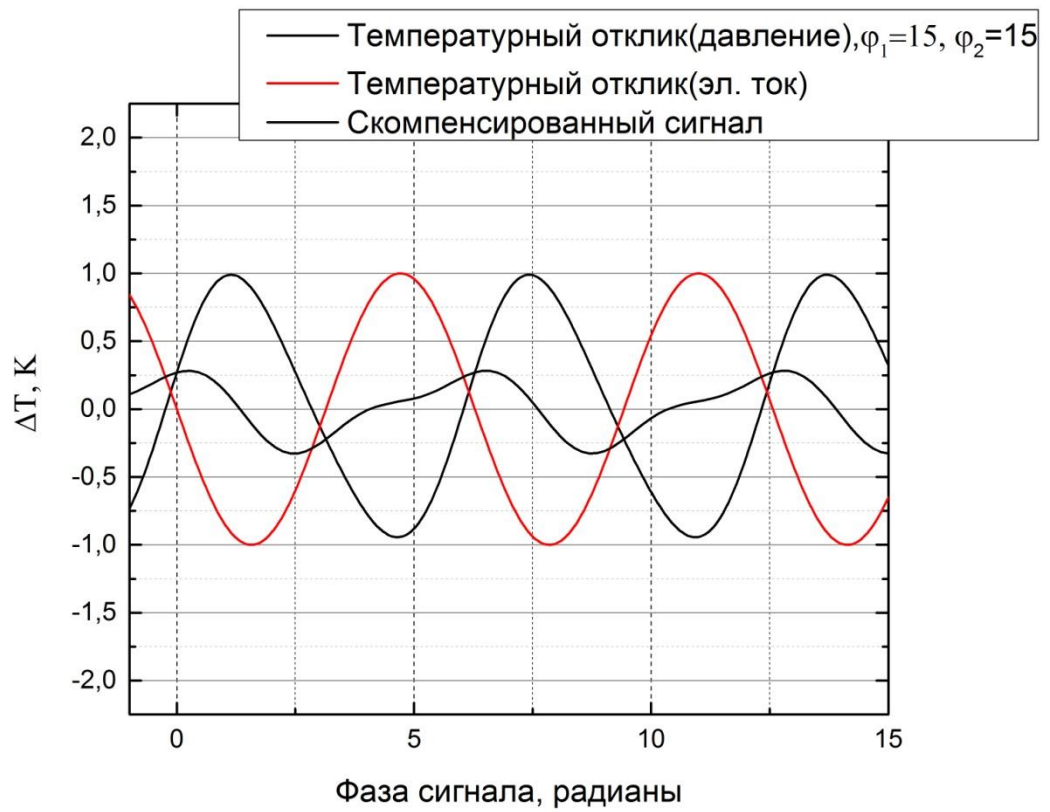


Рисунок 16 - d)

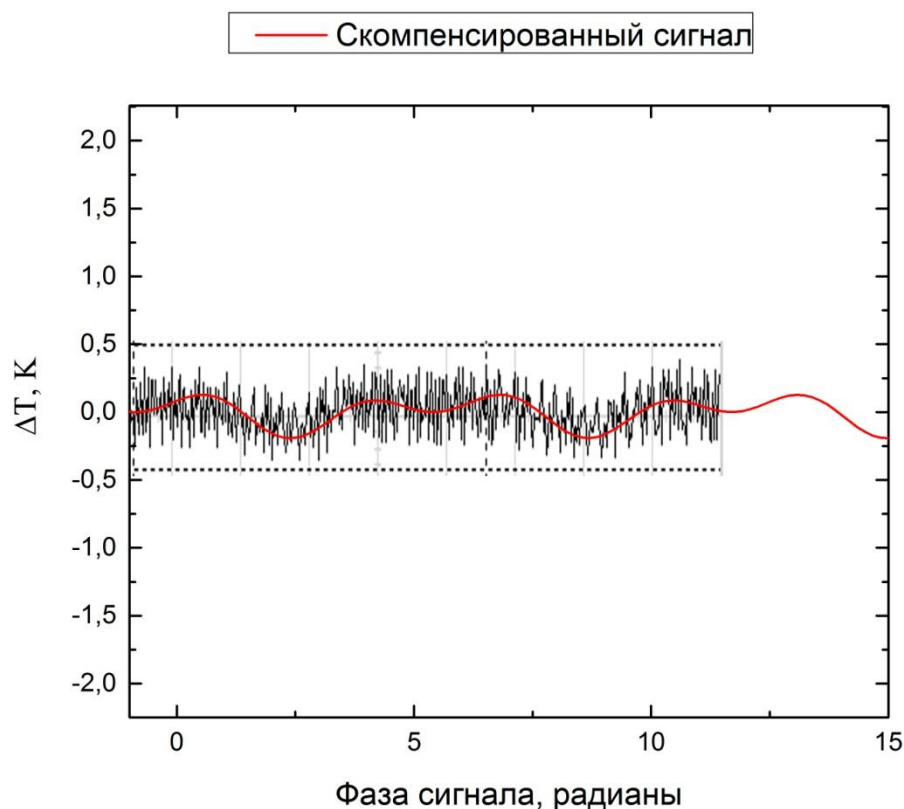


Рисунок 17 - Скомпенсированный сигнал, полученный экспериментально и теоретически (красная линия).

На рисунке 17 представлены колебания температурного отклика после компенсации. Кривой черного цвета обозначены данные, полученные экспериментально. При наложении на них скомпенсированного сигнала (красная линия), рассчитанного выше при $\varphi_1 = 5^\circ$, $\varphi_2 = 1^\circ$, наблюдается совпадение характерной зависимости. Это подтверждает предположения, высказанные ранее о неидеальной компенсации в реальном эксперименте.

Управляя амплитудой колебаний давления и мощности электрического тока и фазовым сдвигом между этими воздействиями, можно свести скомпенсированный сигнал температурного отклика к измеряемому минимуму, который зависит от точности используемых приборов. Однако добиться идеальной компенсации не представляется возможным, так как и в этом случае температурные колебания будут иметь место. В связи с этим в значения амплитуды колебаний мощности и давления необходимо вносить поправки, величина которых определяется с учетом точности измерительных приборов на основе анализа проведения эксперимента в реальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже упоминалось, данная работа носит методический характер, и основной целью являлось усовершенствование метода измерения к.т.р., в основе которого лежит применение двойной модуляции. Метод двойной модуляции в измерениях термодинамических параметров жидкостей является относительно новым среди существующих модуляционных методик, отработанных путем множественного применения и претерпевших значительные усовершенствования с момента их появления. Результаты измерений рассмотренных величин, полученные в других работах, показывают, что компенсационная методика в исходном варианте пригодна для получения значений, по порядку совпадающих с табличными. В целях повышения точности измерений в экспериментальную установку был внесен ряд усовершенствований. Проведены работы по тестированию и отладке установки, выполнены калибровки. Предложен вариант дальнейшего увеличения точности измерений.

Улучшения, рассматриваемые в настоящей работе, при дальнейшем применении, дают возможность для повышения точности измерений термодинамических производных диэлектрических жидкостей.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенной работы была подготовлена установка для измерения коэффициента теплового расширения диэлектрических жидкостей. Были проведены тестовые измерения. Анализ полученных данных показал, что выходной сигнал мощности соответствует синусу с высокой степенью точности, из чего можно сделать вывод о корректной работе системы модуляции мощности.

2. Выполнены калибровочные измерения, необходимые для проведения эксперимента. Полученные калибровки линейны и демонстрируют удовлетворительное согласие. Сделан вывод о возможности увеличения точности измерений, путём внедрения системы оцифровки и программного комплекса LabVIEW.

3. Проведен анализ температурного отклика в случае неидеальной компенсации, что даст возможность вносить соответствующие поправки в получаемые экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.А.Благонравов, «О возможности измерения коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей компенсационным методом с использованием упруготермического эффекта», письма в ЖТФ, том 21, выпуск 24, 26 декабря 1995г., стр. 51-54.
2. Карчевский О.О. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Компенсационный метод измерения коэффициента теплового расширения проводящих и непроводящих жидкостей., Москва 2013.
3. Благонравов Л.А., Карчевский О.О., Иванников П.В., Соболева А.В. Опыт применения двойной модуляции в измерении коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. №1, с.50-55 (2008).
4. Крафтмахер Я.А., Черемисина И.М. Журнал прикладной механики и технической физики, 1965, №2, 114-115
5. Крафтмахер Я.А Журнал прикладной механики и технической физики, 1967, №4 143-144
6. *Glazkov S.Y., Kraftmakher Y. A. High Temp.-High Pressure*, 1986, 18, 465-470
7. Ю.И. Поликарпов, А.И. Слуцкер, Д.Д. Карпов, А.О.Белаш, И.И. Аленичев Автоматизированная установка для измерения комплексного коэффициента теплового расширения полимеров методом модуляционной дилатометрии// Приборы и техника эксперимента, 2004, №3, с. 139-145
8. Corbino O.M. Periodische Widerstands nderungen feiner Metallfden, die durch Wechselstrme zum Glhen Gebracht Werden, Sowie Ableitung Ihrer Thermische Eigenschaften bei Hoher Temperatur // *Phys. Z.*1911. B.12. N 8. S.292-295.

9. Corbino O.M. Termische Oszillationen Wechselstromdurchflossener Lampen mit dunnem Faden und daraus sich Ergebende Gleichrichterwirkung Infolge der Anwesenheit Geradzahligter Oberschwingungen // Phys. Z. 1910. B.11. N 9. S.413-417.
10. Dixon A.L., Rodebush W.H., The Heat Capacities of Liquid Metals. // Amer.Chem.Soc. (1927), V.49. P.1062-1074.
11. Филиппов Л.П., Благонравов Л.А., Стасенко В.А. Способ измерения термического коэффициента давления. Авт. свид. 106572 // Бюлл. изобретений. 1982. № .
12. Благонравов Л.А., Фейссал Модхен. Измерение адиабатического термического коэффициента давления в периодическом режиме // ПТЭ. (1991). №4. С. 167-170
13. Благонравов Л.А. Изобарная теплоемкость легкокипящих металлов в области высоких температур и давлений // ТВТ. 1993. Т.31. №3. С. 476-498.
14. Модхен Ф, «Измерение адиабатического термического коэффициента давления жидкого цезия методом периодического воздействия», Диссертация на соис. уч. степ. канд. физ. - мат. наук., Москва 1990.
- 15.Благонравов Л.А., Карчевский О.О., Иванников П.В., Клепиков А.С. Применение двойной модуляции при измерении коэффициента теплового расширения жидкостей. //Вестник Московского университета. Серия 3.Физика. Астрономия. (2003). №3. 17-21
- 16.Благонравов Л.А., Карчевский О.О., Соболева А.В., Моденов А.А. « Развитие модуляционных методов изучения теплофизических свойств с использованием упруготермического эффекта». Мониторинг. Наука и технологии. (2017) № 2 (31), с.51-63.
- 17.Jean Claude Petit, Leon Ter Minassian, Measurements of $(\partial V / \partial T)_p$, $(\partial V / \partial p)_T$, and $(\partial H / \partial T)_p$, by flux calorimetry, J. Chem. Thermodynamics 1974, 6, 1139-1152.

18.Зарипов З.И. Разработка теоретических и экспериментальных основ определения комплекса термических и теплофизических свойств жидкостей и растворов в калориметре теплового потока, автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
Казань 2005 г