

Введение

Актуальность темы: Практически все процессы, происходящие в природе, протекают с превращением энергии- поглощением или выделением тепла. Некоторые знания в этих процессах позволяют лучше понять тепловые действия физических процессов или химических реакций, большое множество биологических явлений, строение молекул, а также оптимизировать процессы производства и, учитывая энтропию, выяснить условия химических равновесий. Исследование физико-химических процессов и тепловых эффектов химических реакций является задачей термохимии, а важнейшим опытным методом в термохимии, с помощью которого измеряются тепловые эффекты, является калориметрия. Калориметрия- это сумма средств и методов измерения тепловых эффектов, сопутствующих разнообразным физическим, биологическим и химическим процессам [1].

Разработанный в данной работе реактор-калориметр представляет собой тонкую медную пластину с диаметром 60-100 мм, верхняя сторона которой предназначена для облучения электронным пучком различных материалов, в том числе жидкости, в следствие чего имеет форму чаши с тонкими краями, а нижняя сторона содержит датчик температуры, фиксирующий с большой точностью нагрев реактора-калориметра и также содержит нагревательный элемент, который служит для калибровки собственной теплоемкости реактора-калориметра. Вся эта система через блок преобразования сигнала соединяется с компьютером, откуда задаются и считываются показатели «калориметрической системы».

Данная разработка делает процесс измерения энергии импульсного электронного пучка наименее трудоёмким и обеспечивает достаточную точность результатов.

Цель работы: разработка, изготовление и испытание реактора-калориметра для измерения энергии электронного пучка.

Объект исследования: реактор-калориметр для измерения энергии импульсного электронного пучка.

Предмет исследования: совокупность методов и средств измерения тепловых эффектов, сопровождающих различные физические, химические и биологические процессы.

Научная новизна: усовершенствование метода определения энергии импульса заряженных частиц, исключающего множество факторов погрешности измерения, которые не учитываются в настоящей практике.

Практическая значимость: с более точными данными импульса заряженных частиц изучение тепловых эффектов химических реакций и физико-химических процессов значительно увеличивается.

Методы и средства исследований: экспериментальные исследования выполнялись с использованием аппаратуры лаборатории №1: цифровом термометре и электронном нагревателе, предназначенном для удаленного измерения температуры и управляемого нагревания объекта измерения, разработанным в стенах лаборатории, датчика температуры ТСМ ОВЕН ДТС014 50М В3 20, ртутного термометра, измерителя иммитанса e7-21 для определения сопротивления, осциллографа tektronix tds2024c, для определения параметров импульса с ускорителя и нагревателя и импульсного электронного ускорителя.

Реализация работы: экспериментальный реактор-калориметр успешно разработан, собран и испытан в стенах лаборатории №1 ИФВТ ТПУ.

1 Обзор литературы

1.1 Виды теплообмена

Теплообмен – это процесс изменения внутренней энергии без производства работы над телом или самим телом. Теплообмен всегда протекает в обусловленном течении: от тел с наиболее значительной температурой к телам с наиболее малой. В момент, когда температура обоих тел становятся одинаковой, теплообмен прекращается. Теплообмен может осуществляться тремя способами:

- 1 конвекцией;
- 2 излучением;
- 3 теплопроводностью.

1.1.1 Конвекция

Конвекция – это процесс теплопередачи, который происходит путем передвижения энергии потоками жидкости или газа. Пример явления конвекции: маленькая бумажка-вертушка, установленная над огнём свечи или электрической лампой, под воздействием взвихривающегося нагретого воздуха принимается вращаться. Этот процесс можно объяснить таким образом. Воздух, касаясь теплой лампочки, нагревается, расширяется и делается менее плотным, чем холодный воздух вокруг него. Сила Архимеда, действующая на теплый воздух со стороны холодного снизу вверх, больше, чем сила тяжести, которая действует на теплый воздух. Поэтому нагретый воздух взвевается вверх, а на его место встает холодный воздух. Различают два вида конвекции:

- 1 естественная (или свободная), возникающая в веществе самостоятельно при его неравномерном нагревании. При подобной конвекции нижние слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают, а верхние слои, охлаждаются, становятся тяжелее и спускаются вниз;

2 вынужденная, которая наблюдается при перемешивании жидкости мешалкой, ложкой, насосом и т. д.

Для того, чтобы в жидкостях и газах случалась конвекция, нужно их нагревать снизу. Конвекция в твердых телах случаться не может.

1.1.2 Излучение

Излучение – электромагнитное излучение, испускаемое за счет внутренней энергии веществом, находящимся при определенной температуре. Передача энергии излучением различается от других типов теплопередачи: она может реализовываться в полном вакууме. Испускают энергию все тела: и чрезвычайно нагретые, и слегка, например тело человека, костер, электрическая плита и др. Но чем больше температура тела, тем больше энергии передается им излучением. При этом энергия отчасти остается в этих телах, а отчасти отражается. При поглощении энергии тела нагреваются неодинаково, в зависимости от своей поверхности. Темные тела лучше поглощают и излучают энергию, чем светлые тела. Вместе с тем темные тела остывают быстрее из-за излучения, чем светлые тела. К примеру, в светлом чайнике горячая вода продолжительнее сберегает большую температуру, чем в темном.

1.1.3 Теплопроводность

Теплопроводность – явление, когда внутренняя энергия одной части тела получает ее от другой части или другого тела при их прямом контакте. Максимальную теплопроводность имеют металлы. Так, при спуске металлического провода в стакан с горячей водой крайне скоро конец провода станет также горячим. Плохой теплопроводностью владеют шерсть, волосы, бумага, пробка, перья птиц и другие пористые тела. Это происходит из-за того, что между волокнами этих материалов хранится воздух. Самой плохой теплопроводностью владеет вакуум (пространство без воздуха). Поясняется это тем, что теплопроводность – это передача энергии от одной

части тела к другой, которая случается при действии друг на друга молекул или других частиц. В месте, где нет никаких частиц, теплопроводность не может происходить.

Если вдруг зарождается нужда сохранить тело от остужения или согревания, то используют вещества с низкой теплопроводностью. Так, для кастрюль, сковородок ручки из дерева или пластмассы. Дома строят из дерева или кирпича, имеющих плохую теплопроводность, а значит они защищают от остывания [2].

1.1.4 Теплоемкость

Отдельное внимание хотелось бы отнести к понятию теплоемкости. Теплоемкость – количество теплоты, требуемое для нагрева тела на один градус:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (1)$$

где ΔQ – изменение энергии;

ΔT – изменение температуры.

Удельная теплоемкость – это величина, численно равная теплоте, которую необходимо дать единице массы тела m для увеличения его температуры на один градус:

$$c_{уд} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

Из этого можно найти количество теплоты, нужное для нагрева вещества, массы m :

$$\Delta Q = c_{уд} \cdot m \cdot \Delta T, \quad (3)$$

1.2 Калориметрический метод исследования

Значительное число трудов по калориметрии связано с вопросами физики твердого тела. Плоды калориметрических исследований позволяют

овладевать полной термодинамической характеристикой интересующего нас действия и делать наши выводы более категоричными и предсказанными. Присуще, что термодинамический подход обширно заинтересовал еще и биологов, все чаще внедряющих точные методы для исследования процессов в живых организмах.

Все достоверно определенные термодинамические характеристики на сегодняшний день невелики и они не могут обеспечить решение немалого и быстро возрастающего количества задач, затеивающихся в науке и промышленности. Благодаря этому для получения термодинамических данных доводится обращаться к их экспериментальному установлению. Тем не менее предпочтение наиболее разумного пути измерения термодинамических свойств веществ чаще всего бывает труден. С одной стороны, для этого необходимо хорошо знать потенциалы конкретных калориметрических методов, а с другой стороны, внимательно осваивать химические и физико-химические свойства веществ, которые подлежат изучению [1].

1.2.1 Классификация и устройство калориметров

Используемые в калориметрии методы измерений и оборудование очень многообразны, потому что решение калориметрических задач подчиняется исследуемым процессам и обстоятельствами его проведения. Нахождение количества теплоты выделившейся (или поглотившейся) в различных процессах, проводят в особом приборе – калориметре. Множество частей калориметра, между которыми делится все измеряемое тепло называют калориметрической системой. Калориметрические измерения обычно заключаются в слежении за изменением температуры калориметрической системы во время опыта. Нередко для того, чтобы сократить термин «калориметрическая система» все условно замещают термином «калориметр», который, стало быть, используется в двух смыслах. Создание всей классификации калориметров навряд ли вероятно ввиду

многообразности как приборов, так и калориметрических методов. Вследствие этого основные принципы калориметрии излагают, как правило, анализируя наиболее характерные и распространенные калориметры. Их часто различают по предназначению, рабочему интервалу температур, числу реакционных камер и т.д.

Калориметр обычно обозначает сосуд, в котором происходят измеряемые тепловые явления. Выделяющаяся или поглощающаяся в этом сосуде теплота вызывает изменение температуры калориметра, в следствии чего возникает теплообмен с внешней средой. Теплообмен может быть между поверхностью калориметрического сосуда (внутренней оболочкой) и поверхностью полости (внешней оболочкой), где уместен этот сосуд. Тепловой поток W , возникающий между обеими оболочками, увеличивается, если увеличивается разность температур ΔT и увеличивается теплопроводность Λ среды, которая их делит. При неизменной температуре:

$$W = \Lambda \cdot \Delta T, \quad (4)$$

В этом выражении, сходствующем с законом Ома, Λ играет самую важную характеристику применяемого прибора и может предназначаться для классификации разных типов калориметров.

Ввиду этого и отталкиваясь из рассмотрения трудов по калориметрии и микрокалориметрии, больше всех популярна классификация калориметров, включающая: адиабатические, изотермические, диатермические, теплопроводящие и проточные.

В адиабатических калориметрах теплообмена реакционной камеры с окружающей средой нет, либо его мало. Здесь внутренняя и внешняя оболочки изолированы друг от друга практически идеальным термическим изолятором, поэтому калориметр является непроницаемым для тепла. В таких условиях теплота Q выделяемая в калориметре с начала опыта, почти вся расходуется на нагрев его содержимого. По окончании опыта температура калориметра делается выше первоначальной на ΔT и:

$$Q = C \cdot \Delta T, \quad (5)$$

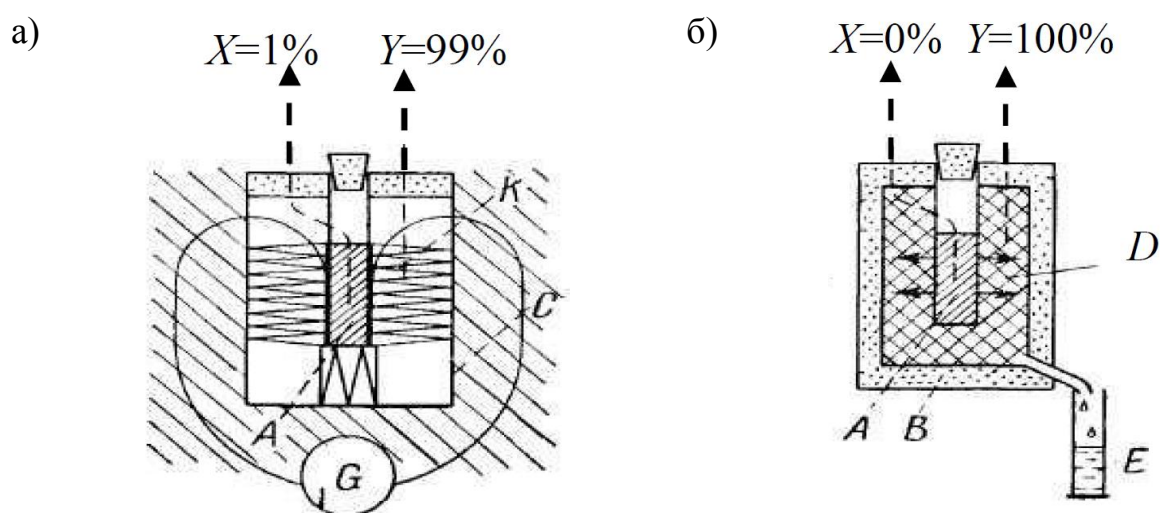
где C – теплоемкость калориметра.

Подобный прибор представляется интегратором, который суммирует все количество теплоты, которое выделяется в нем в течение эксперимента: теплота реакции, механическое перемешивание, испарение и д.р. Чтобы обеспечить условия наименьшего теплообмена пространство между реакционной камерой и внешней оболочкой калориметра стараются вакуумировать. Также очень результативно применение одного или нескольких охватывающих калориметрическую систему экранов, температура которых во время измерения поддерживается одинаковой с температурой внешней поверхности калориметрической системы. Одинаковая температура поддерживается терморегулятором из датчика разности температур и электрическим нагревателем. На практике адиабатические оболочки можно представить сосудами Дьюара, используемыми преимущественно при температурах ниже окружающей. Но все же они не применяются для опытов, длительность которых охватывает порядок нескольких часов; так же теплоемкость сосудов Дьюара находится неудобно, потому что она зависит от длительности опыта.

Адиабатический метод, который был предложен в первый раз французским ученым Персоном (1849), был приведен практически Ричардсом (1905) и на сегодняшний день обширно используется. Тем не менее адиабатические калориметры владеют сравнительно высокой инерцией и работают при температуре, изменяющейся в течение опыта. Исследуемый объект, будь то химический или живой, находится, таким образом, в экспериментальных условиях, изменяющихся во время совершаемых действий. Вследствие этого нелегко определить истинный ритм тепловыделения для стабильных условий.

В изотермических калориметрах теплопроводность калориметра крайне высока и теплота не запасается в калориметре, а стремительно

передается в окружающую среду. Разность температур ΔT в этом случае все время крайне незначительна. Её измерение очень трудоемко и неточно. Она к тому же весьма мало интересна. Изотермические калориметры зачастую используют для нахождения тепловых эффектов длинных процессов и обладают характерным назначением. В калориметрии к этой категории принято причислять калориметры, в которых критерием энергии является количество вещества, поменявшего агрегатное состояние. Но все же к этому же типу возможно причислить и калориметры, в которых эндотермический тепловой эффект восполняют электрической энергией, а экзотермический - эффектом Пельтье (Рисунок 1).



а) – теплопроводящий калориметр Тиана-Кальве; б) – калориметр изотермический

Рисунок 1 – Схема разных типов калориметров

На рисунке введены следующие обозначения: А– зона выделения теплоты; В – изолирующие части; С – внешний блок, хорошо проводящий тепло; D – лед или другое легко плавящееся вещество; К – термопары, связанные с гальванометром G; Е– градуированная пробирка; X – часть теплоты, оставшаяся в калориметрической камере; Y – часть теплоты, рассеявшаяся во внешнюю среду. Максимальная часть выделившейся теплоты теплопроводящего калориметра Тиана-Кальве переводится из зоны А к внешней оболочке по термопарам, которые охватывают

калориметрический сосуд. Замеряют термоэлектродвижущую силу термобатарей, пропорциональную утрачиваемой тепловой мощности. Вся теплота, которая выделилась в изотермическом калориметре применяется для плавления установленного количества без затруднительно плавящегося вещества. Образующуюся в последствии плавления жидкость сосредоточивают и взвешивают.

Ледяной калориметр Бунзена – наиболее идеальный тип изотермического калориметра. В этом приборе находят массу льда, тающего в калориметре под действием теплоты изучаемого процесса. По массе льда, растаявшего с начала опыта, находят, после надлежащих пересчетов, совместное количество выделившейся теплоты Q . Прибор работает в этих условиях и как интегратор. Лед, применяемый в приборе Бунзена, можно заменить каким-нибудь другим без труда плавящимся веществом, если нужно произвести опыты при температурах, от 0°C . В частности в изотермическом калориметре типа Метьюза теплота Q , выделяемая в калориметре, находится по весу четыреххлористого углерода, испарившегося при его нормальной температуре кипения $T_{\text{boil}}=349,66\pm 0,05\text{K}$.

Однако калориметры типа Бунзена или Метьюза весьма сложны в обращении. Также проточные калориметры не поддерживают условия нулевого метода и для них необходим двойной контроль: расхода жидкости и разности двух температур, и едва приближенно изотермичны. Помимо этого изотермические или полуизотермические калориметры показывают чрезмерно высокую термическую инертность, непозволительную в приборах-осциллографах, которые обязаны обеспечить верные измерения выделяющейся теплоты. В самом деле, плавление льда протекает тихо, а равновесие, наступающее в проточном методе, совершается только с крайне значительным запаздыванием.

В диатермических калориметрах количество теплоты находится по изменению температуры калориметрической системы. В нем калориметрический сосуд или блок как правило располагают в гнезде,

которое находится в среде с изменяемой температурой, или просто охватывают калориметрическую систему регулируемые экранами. Охватывающие калориметрическую систему приспособления создадут оболочку калориметра. По порядку проведения измерений калориметры переменной температуры можно распределить на калориметры с изотермической оболочкой и калориметры с адиабатической оболочкой. Метод регистрации теплообмена калориметра с окружающей средой целиком и полностью находится в режиме проведения измерений.

Дифференциальные сканирующие калориметры (ДСК), по сути, причисляются к категории калориметров переменной температуры с непрерывным вводом энергии, функционирующих в адиабатическом режиме. Но из-за того, что ДСК недавно получили весьма обширное распространение и производятся приборостроительной промышленностью в крупных количествах и в различных конструктивных вариациях, обыкновенно их подвергают анализу как особый тип калориметрической аппаратуры.

Теплопроводящие калориметры или калориметры Кальве еще принято разбирать как особенный тип калориметров. В этих калориметрах реакционные камеры окружены дифференциально включенными измерительными термобатареями. Принцип работы калориметра лежит в измерении термоэлектродвижущей силы, которая возникает в термобатарее, когда проходит через неё тепловой поток от реакционной камеры к большому металлическому калориметрическому блоку термостата калориметра или наоборот. При этом температура калориметрической реакционной камеры невелико меняется, всё же эти калориметры не разрешается прозвать диатермическими или строго изотермическими. При компенсации экзотермического теплового эффекта теплотой Пельтье они приобретают общие черты с калориметрами постоянной температуры. Но все же и в этом случае для них свойственна некоторая особенность, присущая лишь для этого типа приборов: нескомпенсированная теплота. Долю выделяемой

энергии обнаруживают в них с помощью измерения мощности теплового потока, зарождающегося между рабочей ячейкой и внешней оболочкой.

В проточных калориметрах тепловой эффект находится по заранее известным удельной теплоёмкости и весу газа или жидкости, расходующих тепло из реакционной камеры, их нагрев или охлаждение при теплообмене.

Изложенное выше описание является, безусловно, не полноценным, но все равно передает общее представление об очень распространенных калориметрических приборах [1].

1.2.2 Проведение и расчет опыта в калориметре с переменной температурой

Калориметрический опыт заключается в измерении количества теплоты Q , сопутствующей проводимую в калориметре химическую реакцию или той или другой иной процесс. Разберем, как находит решение эта задача при применении наиболее распространенных аппаратов – калориметров переменной температуры с изотермической оболочкой. Каждый калориметр переменной температуры можно изобразить для себя состоящим из двух частей – калориметрической системы и оболочки. Калориметрической системой называют сумму всех частей калориметра, между которыми протекает распределение теплоты. Оболочка охватывает калориметрическую систему и обеспечивает назначенные, жестко зафиксированные обстоятельства теплообмена калориметрической системы с окружающей средой.

Нахождение значения теплового эффекта процесса Q из эксперимента, который был проведен в калориметре переменной температуры, указанным выше, производят по уравнению:

$$Q_x = W \cdot \Delta T_x, \quad (6)$$

Численное значение W как правило находят экспериментальным путем при градуировке калориметра, придавая ему известное количество энергии и измеряя порожденное этим увеличение температуры ΔT_x .

Значительная сложность состоит в том, что уровень ΔT_x , который именуют подлинным изменением температуры, невозможно измерить прямо. Для начала, на это значение неминуемо накладывается теплообмен калориметрической системы с окружающей средой. Затем в настоящем калориметрическом опыте почти постоянно приходится взаимодействовать с побочными источниками энергии: трение мешалки калориметра, энергия измерительного тока термометра сопротивления и т.д. Вследствие этого прямо отмечаемое в эксперименте изменение температуры ΔT все время различается от подлинного. Для того чтобы получить подлинное изменение температуры ΔT_x , нужно к значению ΔT ввести поправку на теплообмен и на побочные тепловые эффекты. Зачастую температуру изометрической оболочки ставят выше температуры калориметра. Стало быть, в отсутствие побочных тепловых эффектов:

$$\Delta T_x = \Delta T - \delta, \quad (7)$$

где δ – поправка на теплообмен.

Для подсчёта значения δ есть множество подробно разработанных методов. Все они организованы на слежении за изменением температуры калориметрической системы, во время протекания исследуемого процесса, и в течение кое-какого времени до его начала и окончания. Калориметрический эксперимент как правило состоит из трех этапов. В первом этапе эксперимента, который длится до начала проведения исследуемого процесса, находят скорость изменения температуры калориметрической системы без измеряемой теплоты (так называемый «температурный ход»).

Основной этап – это часть эксперимента, во время которого протекает стремительное и неравномерное изменение температуры калориметра в результате проведения в нем изучаемого процесса. К основному этапу

причисляют еще время, нужное для распределения выделившейся теплоты в калориметрической системе. Разность температур системы в конце и в начале основного этапа $T_n - T_0$ это и есть отмечаемое в эксперименте изменение температуры ΔT .

Последний этап следует незамедлительно за основным этапом. Его начало обуславливается временем, когда заканчивается распределение введенной теплоты в калориметрической системе и настает систематический тепловой режим. Этот момент можно ввести по равномерному изменению температуры системы. В последнем этапе, как и в первом, в течение обусловленного времени находят температурный ход калориметрической системы.

Теплообмен калориметра с окружающей средой выполняется по трем различным механизмам – через теплопроводность, излучение и конвекцию. Так как жесткий учет теплообмена в калориметрическом опыте почти невыполним, нужно придерживаться условиям, при которых упрощенный расчет поправки на теплообмен не искажает итог. Главные из этих условий заключаются в следующем:

- 1 разность температур калориметра и окружающей его оболочки не должна превышать 2-3 градуса;
- 2 внешняя поверхность калориметра и внутренняя поверхность оболочки должны обладать хорошей отражательной способностью;
- 3 расстояние между стенками калориметрического сосуда и оболочки должно составлять около 10 мм; при этом конвекция почти опускается, а теплотери, определенные теплопроводностью воздуха, малы;
- 4 увеличение температуры в эксперименте не должно превосходить 2°C. Наилучшее значение увеличения температуры находится в интервале от 1°C до 2°C.

В данных условиях полный теплообмен изображается законом охлаждения Ньютона, который гласит, что количество теплоты Δq , получаемое или теряемое телом (здесь калориметром) в единицу времени,

пропорционально разности температур тела $T_{\text{кал}}$ и окружающей его оболочки $T_{\text{об}}$:

$$\Delta q = K \cdot (T_{\text{об}} - T_{\text{кал}}), \quad (8)$$

Законы, по которым совершается теплообмен, совсем разнообразны для теплопроводности, излучения и конвекции. Но все же более подробный анализ законов теплообмена показывает, что при соблюдении нужных условий показанная выше формула точно обрисовывает все его виды.

В калориметрах с изотермической оболочкой ее температура держится неизменной (с точностью до $\pm 0,001^\circ$ и выше). В подобных калориметрах поправка на теплообмен очень высока (несколько процентов от ΔT), но может быть вычислена довольно точно. Они используются для изучения температуры довольно стремительных процессов (растворение, сгорание и др.). Для изучения тепловых эффектов продолжительных процессов (от одного часа и больше) применяют главным образом калориметры с адиабатной оболочкой, температура которой удерживается как можно более близкой к температуре калориметра. В прочем существенно уменьшается поправка на теплообмен, определённая в предоставленном случае всего-навсего неточностью поддержания адиабатных условий.

В калориметрах с изотермической оболочкой в период эксперимента во всех трех этапах делается измерение температуры калориметра как правило через равные промежутки времени. В калориметрах с адиабатной оболочкой во всех трех этапах эксперимента делается измерение разности температур оболочки и калориметра, температура же калориметра измеряется лишь в первоначальном и последнем этапах. Изменение температуры калориметра в данных этапах близко к нулю, и поправка на теплообмен составляет довольно низкое значение.

Точность измерений в калориметре переменной температуры, обычно, обуславливается тем, с какой точностью в опыте измерено увеличение температуры самого калориметра ΔT . Для того чтобы увеличить точность

измерений, нужно или повысить увеличение температуры в опыте или увеличить точность измерения температуры. Тем не менее значительно повысить увеличение температуры выше $1-2^{\circ}\text{C}$ без возможных последствий привести значительную погрешность при подсчете поправки на теплообмен неосуществимо.

Длительность первоначального и последнего этапов калориметрического эксперимента обязана быть такой, чтобы была возможна довольно большая точность измерения температурного хода без теплового эффекта. Наряду с этим бессмысленно чрезмерно затягивать первоначальный или последний этапы, поскольку аппроксимация температурного хода линейной зависимостью от времени, применяемая при расчетывании поправки на теплообмен, имеет место только на довольно недолгих временных интервалах в 15-20 мин.

Длительность основного этапа находится временем, нужным для абсолютного распределения энергии в калориметрической системе. Данный период времени может значительно изменяться от скорости протекания исследуемого процесса, температуропроводности системы, условий смешивания калориметрической жидкости и т.д. Например, при нахождении теплоты реакций, проходящих с равной скоростью, длительность основного этапа в анероидных калориметрах значительно выше, чем в жидкостных калориметрах с неплохим смешиванием жидкости [1].

1.3 Виды датчиков температуры по типу действия

Давайте ознакомимся с разнообразными типами датчиков температуры.



Жидкостные термометры

основываются на эффекте расширения жидкости, когда

температура повышается. На месте жидкостей применяют спирт или ртуть при комнатной температуре. Для измерения низких температур, используется жидкий неон, а для высоких, как правило, применяют галлий, находящийся в жидком состоянии уже от 20 С.

Газовые термометры основываются на эффекте расширения при переходе вещества из жидкого в газообразное состояние. Газ налегает через мембрану и замыкает электрические контакты. Диапазон измерений для жидкостных и газовых термометров находится от -200 С до +500 С. Термометры данного типа как правило используются для наглядного наблюдения за температурой или в качестве термостатов в разнообразных нагревателях и холодильниках.

Термоиндикаторы – это специальные вещества, меняющие собственный цвет под влиянием температуры. Подобное изменение цвета бывает как обратимым, так и необратимым. В районе комнатных температур применяются термоиндикаторы в основе которых находятся жидкие кристаллы. Эти кристаллы плавно меняют свой цвет, когда меняется температура. Это изменение, обычно, обратимо. Изготавливаются они в виде

Рисунок 2 - Градусник
(ртутный термометр)



Рисунок 3 -
Thermometer Merk



пленки, зачастую с клейкой подложкой, и предназначены для быстрого визуального наблюдения температуры. Для низких и высоких температур изготавливаются, обычно, необратимые термоиндикаторы.

Это значит, что если температура по меньшей мере один раз превзошла дозволённую, то индикатор необратимо изменяет свой цвет. Подобные термоиндикаторы применяют, для контроля за замороженными продуктами. Главное преимущество термоиндикаторов - это небольшая цена. Их можно использовать как одноразовые датчики температуры [3].

Терморезистивные термодатчики

работают по принципу изменения электрического сопротивления при изменении температуры. Главным элементом здесь терморезистор — элемент меняющий собственное сопротивление из-за изменения температуры окружающей среды. Бесспорные достоинства термодатчиков такого рода это продолжительная постоянство, большая восприимчивость и простота создания интерфейсных схем.

Термисторы производятся из металл-оксидных соединений. Они измеряют только максимальную температуру. Главный недостаток термисторов — это нужда их калибровки, большая нелинейность и устаревание, тем не менее при соблюдении всех необходимых настроек они применяются для прецизионных измерений.

Рисунок 4 -
Temperaturretikett mit
direkter Anzeige
RLC-60 series

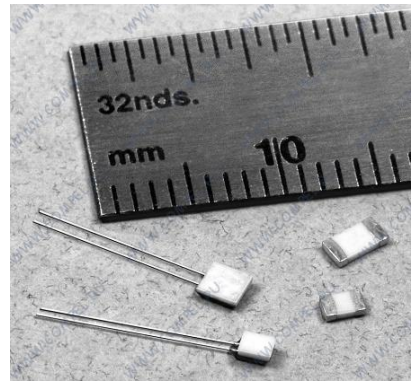
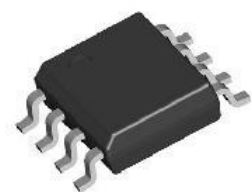


Рисунок 5 - Датчик
702-101BBV-A00



Полупроводниковые датчики

Рисунок 6

фиксируют изменение характеристик р-п перехода под воздействием температуры. В роли термодатчиков применяются различные диоды или биполярные транзисторы. Плюсы этих датчиков — простота и небольшая цена, линейность характеристик, небольшая погрешность.

Полупроводниковый датчик температуры LM75A

Термоэлектрические (термопары) работают на основе термоэлектрического эффекта, основываясь на том, что во всяком замкнутом контуре (из двух разнородных проводников или полупроводников) появляется электрический ток, если места спаев различаются по температуре. Диапазон измеряемых ими температур, от -200 до 2200 градусов. Один из недостатков термопары - довольно значительная погрешность. Чаще всего они используются в электронных термометрах.



Рисунок 7 - Термопара ДТПКХХ4

Пирометры – датчики, не требующие прямого контакта, они регистрируют излучение распространяющееся от нагретых тел. Главным преимуществом пирометров проявляется в отсутствии нужды помещать датчик внутрь контролируемой среды.

Датчики, меняющие свой цвет при температурном воздействии на основе растворов. Этот тип датчиков использует хлорид кобальта, раствор которого владеет тепловой связью с объектом, температуру которого нужно измерить. У раствора хлорида кобальта коэффициент поглощения видимого спектра зависит от температуры. Когда меняется температура - изменяется количество прошедшего через раствор света.

Акустические термодатчики применяются, в основном, для измерения средних и высоких температур. Акустический датчик устроен по принципу того, что от изменения температуры, изменяется скорость распространения звука в газах. Недостатки таких измерений заключаются в том, что при прикосновении у них возможны ответные физиологические реакции, которые влекут за собой искажения измерений глубинной температуры.

Пьезоэлектрические датчики состоят из своего главного элемента- кварцевого пьезорезонатора. Он меняет свои размеры при действии тока. На пьезоматериал поочередно подается напряжение разной полярности, от чего он начинает колебаться. Частота колебаний резонатора зависит от температуры. Данное явление и лежит в основе пьезоэлектрического датчика температуры [4].



Рисунок 8 -
Структурная схема
Кварцевого
Пьезорезонатора

1.4 Практическое применение электронных ускорителей

Первостепенные ускорители заряженных частиц были изобретены в двадцатых – тридцатых годах для того, чтобы проводиться фундаментальные исследования в области атомной и ядерной физики. С тех времен энергия ускоренных частиц повышалась на порядок приблизительно каждые десять лет. Одновременно с ускорителями на высокие и сверхвысокие энергии, проектировались различные виды ускорителей на средние и низкие энергии для прикладных целей.

Большое распространение в радиационных технологиях на сегодняшний день приобретают электронные ускорители. Радиационные технологии в промышленности имеют высокие экономические показатели: небольшие эксплуатационные расходы, экономия сырья и материала, удовлетворение экологическим нормам и большая производительность. Дабы

не расписывать каждый метод применения этих ускорителей в промышленности и повседневной жизни, сведем весь общий перечень в таблицу ниже [5].

Таблица 1 – Практическое применение электронных ускорителей [5]

Электронные ускорители в медицине	
Лучевая терапия злокачественных новообразований	- Радикальная лучевая терапия; - Паллиативная лучевая терапия; - Симптоматическая лучевая терапия.
Лучевая терапия неопухолевых заболеваний	- Заболевания воспалительного характера; - Дегенеративно-дистрофические процессы опорно-двигательного аппарата; - Невралгии, невриты, фантомные боли, болезни кожи и др.
Интраоперационная лучевая терапия	- Рак молочной железы; - Рак желудка, ободочной и прямой кишок; - Рак яичников и тела матки; - Остеогенная саркома
Инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК)	
- Интроскопия легковых автотранспортных средств весом до 3-х тонн; - Интроскопия крупногабаритных объектов (контейнеров, трейлеров, вагонов).	
Радиационная дефектоскопия	
- Неразрушающий контроль крупногабаритных изделий в атомной, химической, нефтегазовой, судостроительной промышленности (толщины контролируемых изделий в стальном эквиваленте до 600 мм).	
Радиационные технологии	
Модифицирование материалов	- Производство кабелей и проводов с радиационно-сшитой изоляцией; - Изготовление упрочненных и термоусаживающихся изделий; - Вулканизация эластомеров и изделий из них.
Полимеризация	- Отверждение покрытий; - Прививочная полимеризация; - Производство модифицированных пористых материалов.
Радиационная деструкция	- Получение корма и кормовых добавок из целлюлозосодержащих отходов; - Регулирование молекулярной массы полимеров; - Деструкция тефлона и резин.
Стерилизация медицинских изделий	- Стерилизация медицинских изделий одноразового пользования; - Стерилизация фармацевтических препаратов; - Стерилизация органов и тканей, используемых в имплантационной хирургии.
Радиационно-физическая технология	- Легирование полупроводников; - Обработка изделий электронной техники; - Нарботка радиоактивных изотопов, удаленных от полосы β-стабильности.
Радиационная обработка пищевых продуктов	- Замедление прорастания овощей при хранении; - Дезинсекция зерна и фруктов; - Стерилизация мясных продуктов.
Охрана окружающей среды	- Очистка выбросных газов; - Обработка твердых отходов. - Очистка сточных вод и осадков сточных вод.

2 Объект и методы исследования

2.1 Импульсный электронный ускоритель

Электронный ускоритель служит для получения пучков электронов высоких энергий. В основе его работы заложен принцип взаимодействия электронов с электрическим и магнитным полями.

Электрическое поле напрямую совершает работу над частицей, увеличивая её энергию, в то время как магнитное поле с помощью силы Лоренца отклоняет частицу, не изменяя её энергию, тем самым задавая орбиту, по которой движется частица. Ускорители по типу конструкции можно разделить на две большие группы: линейные и циклические. В линейных ускорителях пучок заряженных частиц проходит ускоряющий промежуток один раз, а в циклических частицы движутся по замкнутым траекториям, проходя ускоряющие промежутки по многу раз.

Наибольшее распространение в промышленности получили небольшие линейные ускорители электронов, либо электростатические, либо импульсные, на энергию $0,1 \div 5$ МэВ. В импульсных ускорителях высокое напряжение создается импульсным трансформатором при разряде большого количества конденсаторов.

Самыми популярными в промышленности являются небольшие линейные ускорители электронов на энергии от 0,1 до 5 МэВ, которые можно условно разделить на две группы: электростатические и импульсные. Высокое напряжение в импульсных ускорителях создается при разряде большого количества конденсаторов на импульсный трансформатор.

Области применения электронных ускорителей: обработка материалов электронным пучком, для придания новых свойств вследствие радиационной полимеризации, вулканизации, модифицирования поверхностных слоев; стерилизация продуктов питания, медицинского оборудования и материалов; очистка сточных вод, выбросов газов; источники гамма-излучения для рентгеновской дефектоскопии; электронно-лучевая сварка.

Ускоритель заряженных частиц в лаборатории №1 ИФВТ ТПУ (Рисунок 9) относится к линейным импульсным электронным ускорителям промышленного назначения. Он позволяет получать пучки электронов, из взрыво-эмиссионной плазмы.



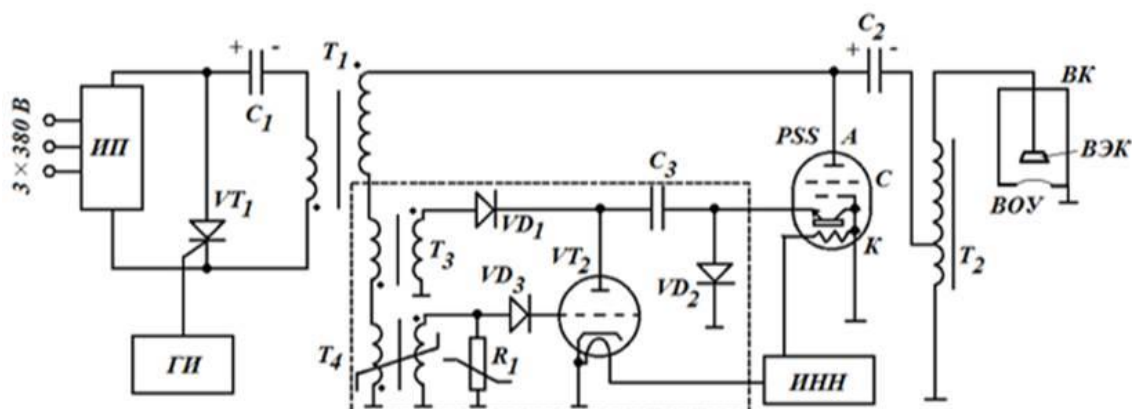
ИП-источник питания; 1- импульсный трансформатор T_1 ; 2- корпус импульсного генератора; 3 – компрессор криовакуумного насоса; 4 – кожух местной биологической защиты (вакуумная камера ускорителя расположена внутри кожуха)

Рисунок 9 – Внешний вид импульсного сильноточного электронного ускорителя.

Основным назначением импульсного электронного ускорителя является очистка и обеззараживание промышленных сточных вод.

Работой электронного ускорителя является разряд батареи емкостных накопителей на электронный диод. Промежуточных формирующих линий (ДФЛ, ОФЛ, полосковых линий и д.р.) в ускорителе нет. Поэтому импульс напряжения на нагрузке – электронном диоде имеет квазисинусоидальную форму.

Принципиальная электрическая схема высоковольтного импульсного генератора ускорителя представлена на рисунке ниже.



ИП – источник питания; ГИ – генератор импульсов; C_1 – первичный емкостной накопитель; VT_1 – тиристорный коммутатор; T_1 – повышающий импульсный трансформатор; C_2 – высоковольтный емкостной накопитель; PSS – псевдоискровой разрядник (PseudoSpark Switcher); T_2 – высоковольтный импульсный трансформатор; T_3 – импульсный трансформатор тока; C_3 – конденсатор; VT_2 – маломощный импульсный тиратрон с термокатодом; T_4 – пик-трансформатор; R_1 – варистор; ИНН – источник накальных напряжений; VD_1 , VD_2 , VD_3 – диоды; БК – вакуумная камера; ВЭК – взрывоэмиссионный катод; ВОУ – выводное окно ускорителя. Пунктирной линией ограничен блок запуска коммутатора PSS

Рисунок 10 - Принципиальная электрическая схема высоковольтного импульсного генератора ускорителя.

Первичный емкостной накопитель C_1 получает подзарядку от источника питания (ИП). Когда появляется сигнал управления от генератора импульсов ГИ, тиристорный коммутатор VT_1 открывается и емкость C_1 через трансформатор T_1 разряжается на емкостную батарею C_2 . В этот момент через трансформатор T_2 заряжается емкость C_3 в схеме запуска псевдоискрового разрядника PSS.

Блок запуска псевдоискрового разрядника функционирует следующим образом. После прохождении полной передачи энергии из емкости C_1 в C_2 ток в контуре изменяет полярность, что предвещает подачу на коммутатор VT_2 отрицательного импульса с пик-трансформатора T_4 , который работает в режиме насыщения. Отрицательный импульс с пик-трансформатора T_4 открывает коммутатор VT_2 , и, так как емкость C_3 тоже заряжена током разрядки C_1 на C_2 , совершается разряд емкости C_3 в контуре C_3 - VT_2 -PSS. В итоге псевдоискровой разрядник PSS открывается и емкостная батарея C_2 разряжается на нагрузку генератора – электронный диод – через повышающий трансформатор T_2 .

Отличительной особенностью ускорителя является высоковольтный импульсный генератор без формирующей линии, который загружен непосредственно на вакуумный электронный диод. В диоде применяется взрывоземиссионный планарный катод, который закреплен на полой катододержателе. Сквозь полость катододержателя прокачивается трансформаторное масло, снабжая отвод тепла от катода. Используемая конструкция катододержателя разрешает крепить катоды из разнообразных материалах диаметром 40 мм и менять длину ускоряющего промежутка d от 10 до 45 мм [6].

2.2 Классическая методика измерения энергии импульсного электронного пучка

Для измерения энергии пучков заряженных частиц широко применяют калориметрические методы. Принцип одного из них заключается в следующем: имеется небольшая медная пластина известной массы. На нее подается серия импульсов заряженных частиц. При этом пластина калориметра нагревается. Зная массу пластины, удельную теплоемкость меди и температуру, на которую нагрелась пластина, вычисляют энергию одного импульса заряженных частиц:

$$Q_{\text{имп}} = \frac{c_{\text{уд}} \cdot m \cdot \Delta T}{N}, \quad (9)$$

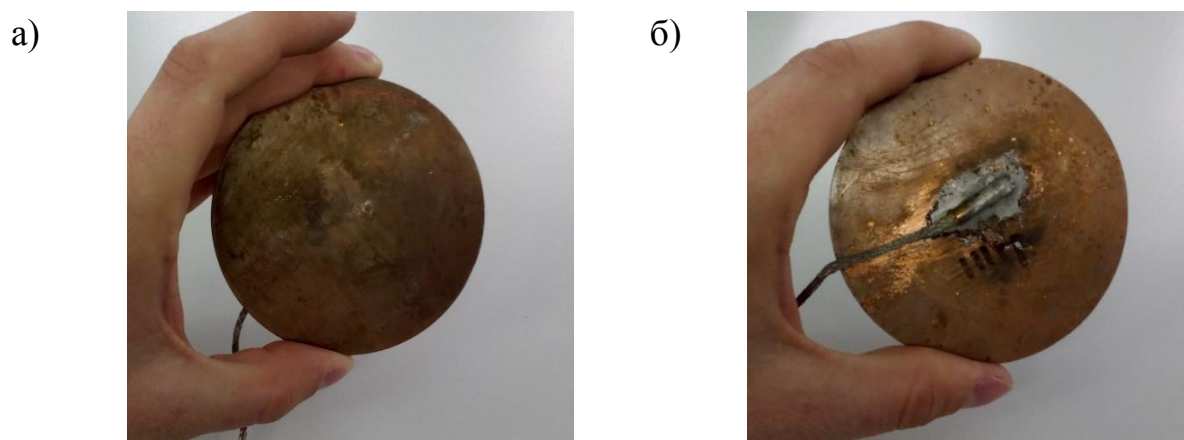
где $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость меди 0,385 Дж/г*К;

m – масса медной пластины 100 г;

ΔT – температура, на которую нагрелась пластина;

N – число импульсов, обычно 10.

Подобные калориметрические исследования в обязательном порядке проводятся на всех ускорителях заряженных частиц в лаборатории №1 ИФВТ ТПУ.



а) – вид сверху; б) – вид снизу (с датчиком температуры)

Рисунок 11 – Калориметр лаборатории №1 ИФВТ ТПУ

Недостатком данного метода является низкая точность измерения, которая связана с инерционностью процесса охлаждения мишени калориметра (при коротких временных промежутках между импульсами), также с нестабильностью атмосферных условий помещения, где проводятся исследования. Помимо этого, метод является косвенным (в контакте калориметра с водой отвод тепла станет еще хуже, также не учитываются удельные теплоемкость проводов, датчика температуры и д.р.), в связи с чем существует большая дополнительная погрешность.

3 Расчеты и аналитика

3.1 Тестирование электронного блока на измерении температуры

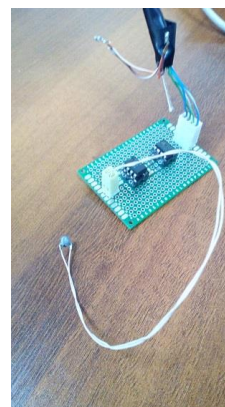
В 2013 году в стенах лаборатории №1 ИФВТ ТПУ разрабатывался цифровой термометр и электронный нагреватель (назовем его электронный блок), предназначенный для удаленного измерения температуры и управляемого нагревания объекта измерения [7]. Этот электронный блок было решено использовать в данной научно-исследовательской работе, но после его сборки он так и не тестировался и не использовался. Поэтому было решено сначала протестировать электронный блок на работоспособность.

Процесс измерения температуры электронным блоком протекает следующим образом: на плату измерения температуры подается питание от основного блока (или от элемента питания 9В типа крона). Плата измерения температуры, где датчик температуры является частотоподающим элементом, генерирует частотный сигнал, являющийся функцией от текущей температуры. Сигнал по интерфейсу RS485 передается в основной блок. Основным блоком по отношению к плате измерения температуры является обычный частотомер. Измеренная частота передается на ПК через интерфейс RS232, далее через известную температурно-частотную зависимость, через полином, определяется температура.

а)



б)



а) – блок управления; б) – датчик температуры

Рисунок 12 – Цифровой термометр

Связь с персональным компьютером осуществляется с помощью программы «Putty» [8] (Рисунок 13), поэтому было необходимо раздобыть, установить этот пакет, подключить электронный термометр к персональному компьютеру и освоить пакет «Putty» [7].

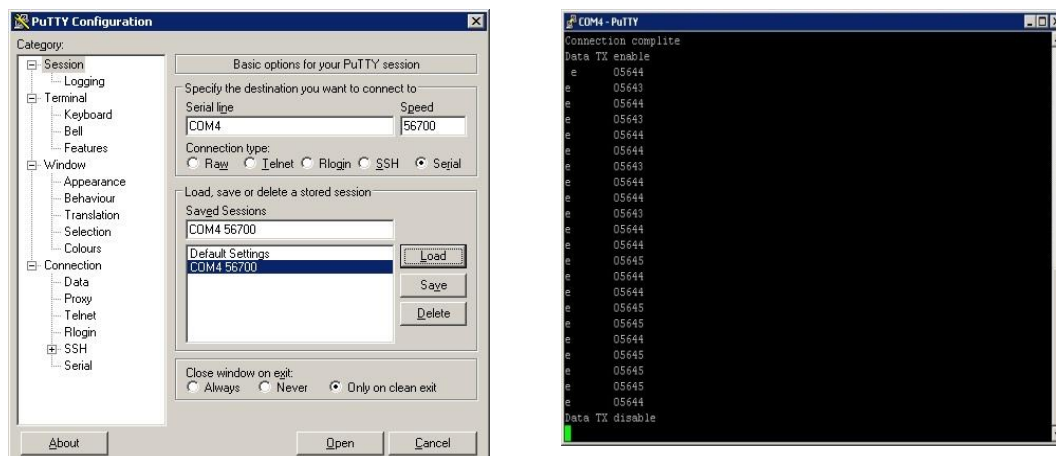


Рисунок 13 – Интерфейс программы Putty

После освоения Putty началась стадия экспериментов по определению работоспособности изучаемого электронного датчика. Для этого было взято два других измерителя температуры- ртутный градусник и электронный измеритель температуры на основе термосопротивления «Овен ДТС 014» [9].

Термометр сопротивления медный ТСМ ОВЕН ДТС014 50М В3 20 является датчиком температуры с кабельным выходом и предназначен для непрерывного измерения температуры различных сред и работает совместно с приборами, имеющими вход под термосопротивления (Рисунок 14).

а)



б)



а) – ртутный градусник; б) – электронный измеритель температуры
на основе термосопротивления «Овен ДТС 014»

Рисунок 14 - Измерители температуры

Технические характеристики на термопреобразователь ДТС014 50М В3
20 [9]:

- 1 Длина погружной части L: 20 мм;
- 2 Диапазон измеряемых температур: -50..+150 град С;
- 3 Условное давление: 10 Мпа (100 кгс/см²);
- 4 Диаметр датчика D: 5 мм;
- 5 Номинальная статическая характеристика НСХ: 50М;
- 6 Класс допуска: В;
- 7 Схема внутренних соединений проводников: 3 – трехпроводная (под заказ 2 и 4-проводная);
- 8 Степень защиты: IP54.

В ходе экспериментов (Рисунок 15Рисунок 15) все датчики погружались в воду и вода постепенно нагревалась. Через какие-то промежутки времени фиксировалась температура воды с ртутного градусника и электронного измерителя температуры на основе термосопротивления и сопоставлялась со значениями, выводимыми на интерфейс программы Putty с основного блока исследуемого датчика температуры.



Рисунок 15 – Процесс экспериментов

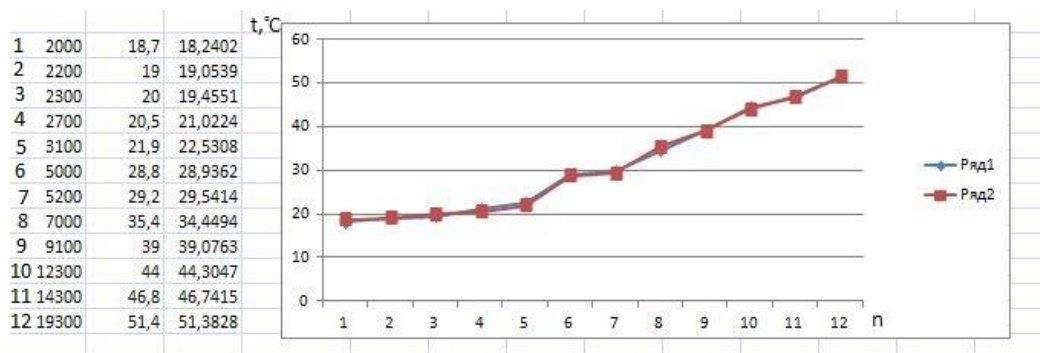
После экспериментов началась работа по обработке результатов. По зависимостям температуры с датчиков сравнения и массива данных с программы Putty в программе Original Pro были найдены коэффициенты для кубического полинома вида $T(F) = A \cdot F^0 + B \cdot F^1 + C \cdot F^2 + D \cdot F^3$ (Рисунок 16).

а)	A=	9,22812	б)	• A = 5,03927702399709
	B=	0,00492		• B = 0,00401080976306772
	C=	-2,14534E-07		• C = -2,18618299636127e-007
	D=	3,77107E-12		• D = 6,04508939402609e-012

а) – экспериментально найденные; б) – по умолчанию

Рисунок 16 Коэффициенты для кубического полинома

Далее, через известную температурно-частотную зависимость и известный полином была определена температура с исследуемого цифрового термометра. Коэффициенты для полинома ставились сначала собственные, они со сравнительными данными сходились идеально, затем ставились исходные коэффициенты- результат был далек от нормального, т.е. не сходиллся со сравнительными данными.

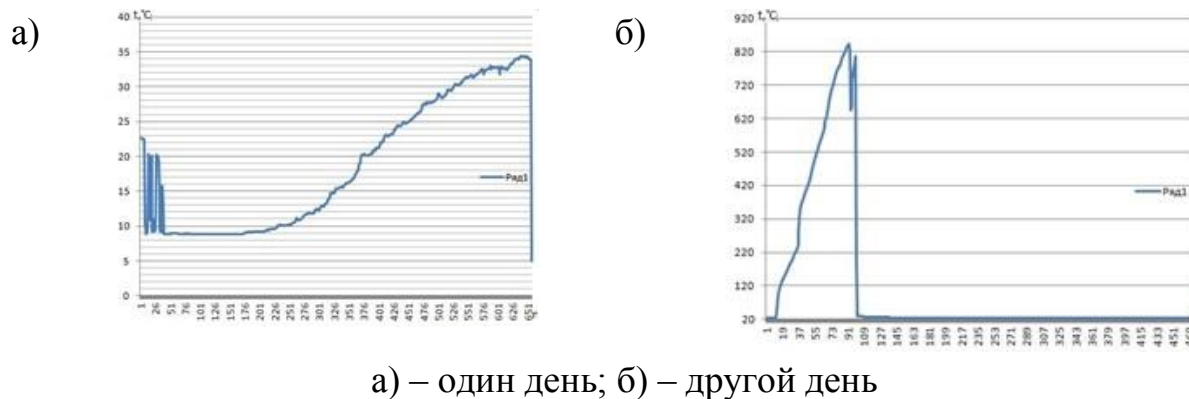


Ряд 1– сравнительные измерители температуры,

Ряд 2– исследуемый датчик температуры

Рисунок 17 – Сравнение температур

На следующий день после повторной проверки цифрового термометра по аналогичной схеме обнаружилось, что уже при собственно найденных коэффициентах для полинома результаты не сходились со сравнительными измерителями температуры (Рисунок 18).



а) – один день; б) – другой день

Рисунок 18 – Фиксирование температуры через один и тот же полином в разные дни

В результате были проведены дополнительные эксперименты, где точно обнаружилось, что исследуемый цифровой термометр с течением времени сбивается и показывает неправильные данные фактической температуры. Поэтому встал вопрос о поиске другого датчика температуры.

3.2 Тестирование электронного блока на функцию управляемого нагрева

Помимо измерения температуры электронный блок, разработанный в стенах лаборатории, должен был подавать прямоугольные импульсы, число и время которых задавалось бы с компьютера. Эта функция нужна для определения теплоемкости всей калориметрической системы. И для того, чтобы проверить, справляется ли электронный блок с этой задачей, необходимо было произвести ряд экспериментов. Для этого был приобретен мощный резистор номиналом 11 Ом [10].



Рисунок 19 – Резистор ПЭВ-25-11 Ом 5%

Данный резистор был подключен к электронному блоку, который, в свою очередь, был подключен к персональному компьютеру. С помощью программы «Putty» были заданы число и время прямоугольных импульсов.

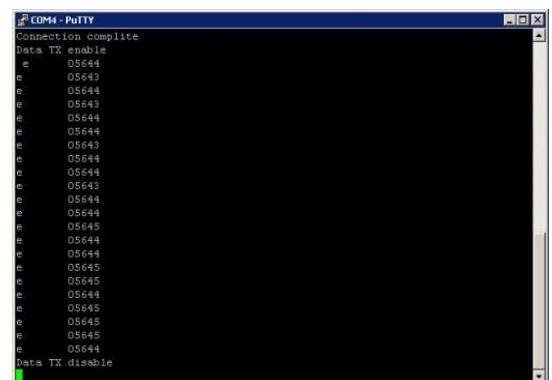
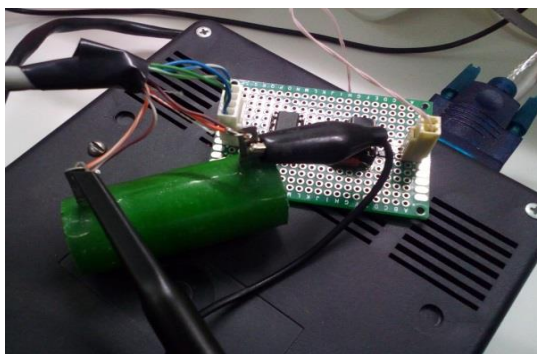


Рисунок 20 – Подключение осциллографа к исследуемому объекту и управление сигналами через интерфейс программы «Putty»

Для подтверждения работоспособности нагревательной функции электронного блока к выводам резистора дополнительно был подключен осциллограф. Результаты эксперимента можно наблюдать на осциллограммах ниже.

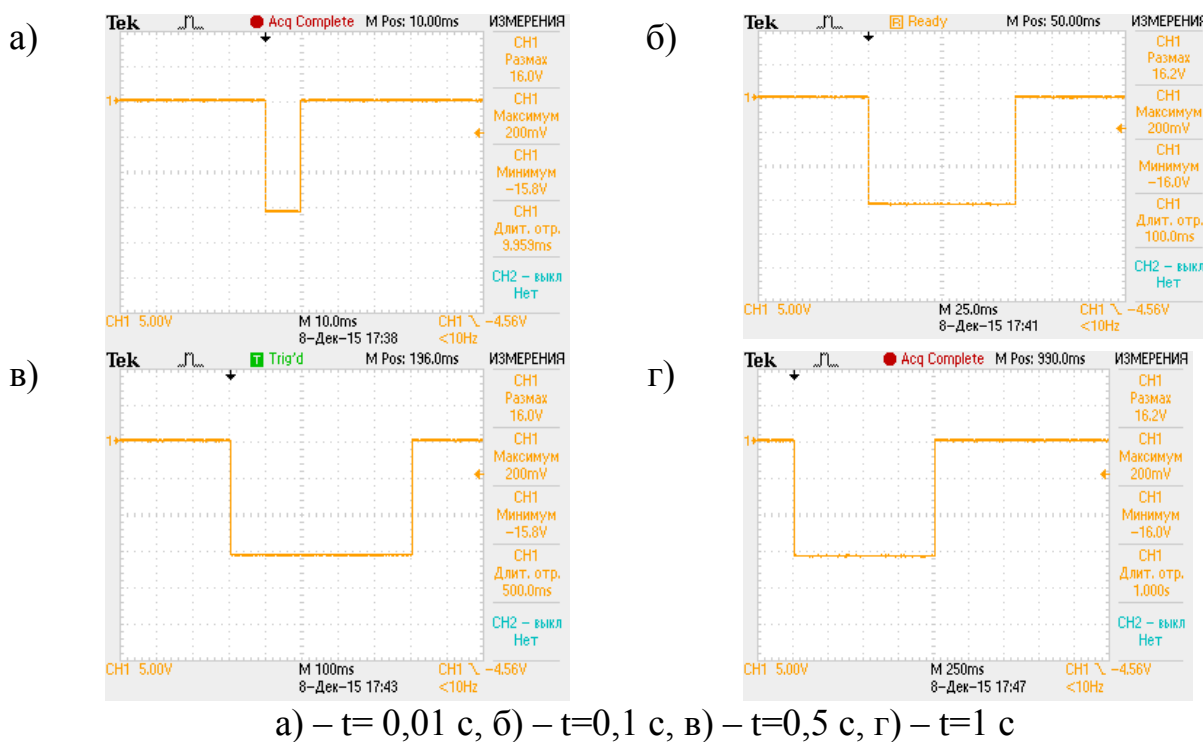


Рисунок 21 - Осциллограммы с параметрами импульса N=1

Как видно из осциллограмм, напряжение на резисторе оказалось 16 В. В программе «Putty» был задан один импульс с различной длительностью и, как подтверждают осциллограммы рисунка, с функцией регулирования длительности времени импульса электронный блок справляется.

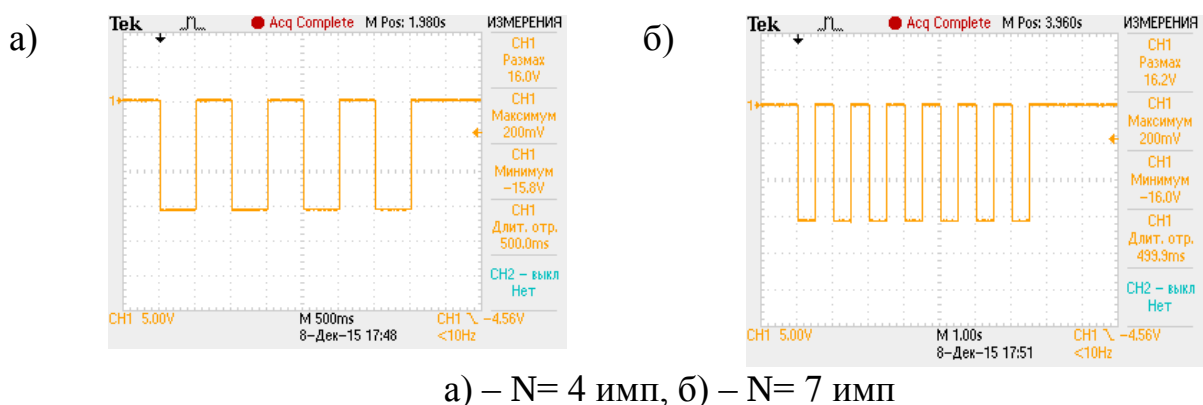


Рисунок 22 - Осциллограммы с параметрами импульса $T = 0,5$ с

Далее в программе «Putty» была задана длительность импульса 0,5 с с различными количествами импульсов и, как видно по осциллограммам рисунка, с функцией регулирования количества импульсов электронный блок справляется.

На основе этих экспериментов было доказано, что электронный блок, разработанный в стенах лаборатории №1 ИФВТ выполнял функцию управляемого нагревания объекта измерения, поэтому был использован для выполнения научно-исследовательской работы.

Также обнаружился недостаток в работе электронного блока- при его подключении через вилку питания 220В и к USB входу стационарного персонального компьютера иногда происходили сильные помехи со стороны платы управляемого нагревания объекта измерения. Для устранения недостатка было решено питание платы осуществлять элементом типа «крона» и использовать ноутбук, работающий от аккумуляторной батареи.

3.3 Разработка и изготовление мишени реактора-калориметра

Мишень реактора-калориметра представляет собой тонкую металлическую пластину с тонкой стенкой для удержания экспериментальной жидкости сверху, а снизу имеющую нагревательную проволоку и датчик температуры.

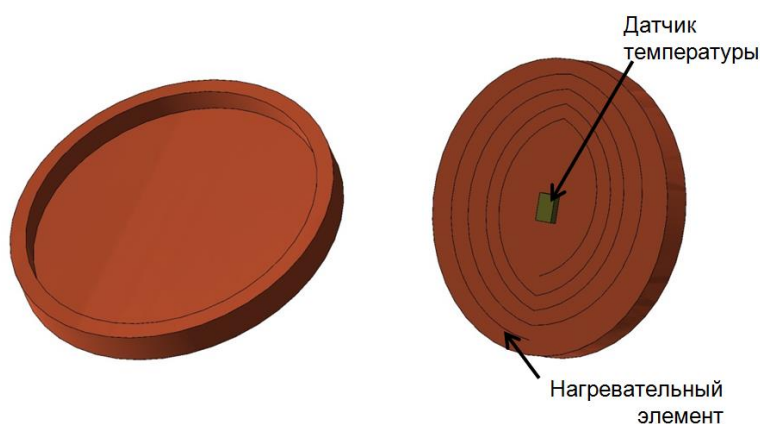


Рисунок 23 – Компьютерный чертеж мишени реактора-калориметра

3.3.1 Подбор материалов для мишени реактора-калориметра

Материал мишени реактора-калориметра должен был обладать хорошей теплопроводностью. Для сравнения показателей теплопроводности различных металлов была рассмотрена таблица теплопроводности металлов и сплавов.

Таблица 2 - Теплопроводность металлов и сплавов λ , Вт/(м·К) [11]

Металл	Температура		
	200 К	300 К	400 К
Алюминий	237	237	240
Вольфрам	185	174	159
Железо	94	80	70
Золото	323	317	311
Кобальт	122	100	85
Медь	413	401	393
Нихром	нет данных	12	нет данных
Олово	73	67	62
Платина	73	72	72
Свинец	37	35	34
Серебро	430	429	425

В таблице теплопроводности металлов и сплавов видно, что при комнатной температуре наибольшей теплопроводностью обладают такие металлы как:

- 1 Серебро;
- 2 Медь;
- 3 Золото.

Исходя из финансовых ограничений, материалом для мишени реактора-калориметра была выбрана медь, как и в обычном калориметре.

Нагревательный элемент представляет собой проволоку, которая хорошо нагревается. Количество теплоты Q [Дж], которое выделяется в проводнике, когда по нему проходит электрический ток, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени, за которое проходит ток и подсчитывается по закону Джоуля-Ленца:

$$Q=I^2 \cdot Rt , \quad (10)$$

где R – сопротивление проводника, Ом;

t – время, с.

Следовательно, материал для нагревательного элемента был выбран по наибольшему удельному сопротивлению проводников (Таблица 3).

Таблица 3 – Таблица удельных сопротивлений проводников [12]

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ в $\frac{\text{ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,015
Медь	0,0175
Золото	0,023
Латунь	0,025... 0,108
Алюминий	0,028
Натрий	0,047
Иридий	0,0474
Вольфрам	0,05
Железо	0,1
Олово	0,12
Свинец	0,22
Нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца)	1,05... 1,4
Фехраль	1,15... 1,35
Висмут	1,2
Хромаль	1,3... 1,5

Опираясь на доступность материалов, для изготовления нагревательного элемента был выбран нихром.

Необходимую длину проволоки возможно найти по формуле:

$$L=r*S/\rho, \quad (11)$$

где r – сопротивление проводника в омах;

ρ – удельное сопротивление проводника;

l – длина проводника в м;

S – сечение проводника в мм^2 .

В нашем случае была выбрана проволока сечением 0,025 мм, поэтому примерная длина проволоки получилась 0,405 м.

В качестве датчика температуры планировалось использовать датчик температуры электронного блока, разработанного в стенах лаборатории, но, к сожалению, он оказался в нерабочем состоянии, поэтому пришлось искать альтернативу. Ей был выбран датчик температуры, используемый в настоящее время в лаборатории, так как для его использования уже имелась необходимая аппаратура (Рисунок 24). Этим датчиком является термопреобразователь сопротивления ОВЕН ДТС014-50М.В3.20/1 [9].



Рисунок 24 – Табло для датчика температуры ОВЕН ДТС014-50М.В3.20/1

Для изоляции проволоки нагрева от медной пластины было решено использовать Цапонлак. Цапонлак предназначен для защитно-декоративного покрытия изделий из черных и цветных металлов, кирпича, а также камня, керамики, дерева, стекла и д.р., эксплуатирующихся при температуре от -30С до +15 °С. Он представляет собой такую смесь, как растворенная нитроцеллюлоза и искусственные смолы [13].

Материалом для теплоизоляции был выбран экструдированный пенополистирол. Экструдированный пенополистирол (или экструзионный пенополистирол) – синтетический теплоизоляционный материал, впервые созданный в США в 1941 году. Экструдированный пенополистирол эффективно осуществляет теплоизоляцию самых разнообразных объектов, конструкций и сооружений. Ему присущи самые малые показатели теплопроводности в ряду прочей схожей продукции, ему свойственны химическая стойкость, высокая прочность на сжатие, водо- и паронепроницаемость, а еще устойчивость к образованию плесени и грибков.

Эксплуатировать экструдированный пенополистирол можно при температуре от -50°C до $+75^{\circ}\text{C}$. Наряду с этим, экструдированный пенополистирол причисляется к классу экологически чистых материалов [14].

3.3.2 Изготовление мишени реактора-калориметра

На первых этапах изготовления мишени реактора-калориметра было решено опустить изготовление борта для жидкости, чтобы просто произвести дальнейшие испытания. В итоге была вырезана пластина из куска меди, диаметром 100 мм. Нижняя часть пластины была покрыта изоляцией в виде Цапонлака (Рисунок 25а) – покрытие изоляцией; б) – крепление нагревательного элемента и датчика температуры; в) – крепление к теплоизоляции

Рисунок 25 а). Для придания проволоки вид равномерной спирали была использована липкая лента (скотч), чтобы фиксировать витки. Затем спираль из проволоки вместе с липкой лентой максимально плотно были нанесены на медную пластину. Скотч в данном случае выполнял функцию не только фиксирования для витков проволоки, но и теплоизоляционную функцию. Таким же способом плотно к пластине был прижат датчик температуры ОВЕН ДТС014-50М.В3.20/1. Также, для подключения нагревательной спирали к электронному блоку управляемого нагрева, на концы спирали был припаян термостойкий монтажный провод с изоляцией из фторопласта МГТФ (Рисунок 25 б). Для теплоизоляции всей конструкции в куске экструдированного пенополистирола было вырезано место по габаритам мишени реактора-калориметра с одной стороны на 5 мм и место для вывода сигнальных и питающих проводов с другой стороны (Рисунок 25 в).

а)



б)



в)



а) – покрытие изоляцией; б) – крепление нагревательного элемента и датчика температуры; в) – крепление к теплоизоляции

Рисунок 25 – Этапы изготовления мишени реактора-калориметра

3.4 Определение теплоемкости всей калориметрической системы

Для определения теплоемкости всей калориметрической системы сначала было найдено количество теплоты, необходимое для нагревания нашей пластины на 1 °С теоретически:

$$Q_{\text{полн теор}} = m \cdot c_{\text{меди}} \cdot \Delta T, \quad (12)$$

где m – масса медной пластины 6,65 г;

$c_{\text{меди}}$ – удельная теплоемкость меди
0,385 Дж/г*К;

ΔT – разница температур при нагреве 1 °С.

Итого: $Q_{\text{полн теор}} = m \cdot c_{\text{меди}} \cdot \Delta T = 6,65 \cdot 0,385 \cdot 1 = 2,56$ Дж



Рисунок 26 -
Взвешивание

Далее было выяснено, на сколько нагреется наша пластина, если мы реально подадим на нее столько энергии. Для этого нужно было узнать мощность нагревателя, которая является неизменной величиной ($P=\text{const}$) и правильно настроить параметры нагрева с электронного блока.

$$Q_{\text{полн}} = P * t_{\text{нагр}} , \quad (13)$$

где P – мощность нагревателя;

$t_{\text{нагр}}$ – время нагрева экспериментальное.

Мощность нагревателя была найдена по известным показателям сопротивления нагрузки и напряжения на ней:

$$P = U^2 / R , \quad (14)$$

где U – напряжение на проволоке, равное 16 В;

R – сопротивление проволоки, равное 12,6 Ом.

Итак, мощность нагревателя была получена $P = 16^2 / 12,6 = 20,32$ Вт.

Для того, чтобы найти время нагрева экспериментальное, было решено обратиться к теоретической части:

$$t_{\text{нагр}} = Q_{\text{полн теор}} / P , \quad (15)$$

По всем известным величинам было найдено время нагрева экспериментальное $t_{\text{нагр}} = Q_{\text{полн теор}} / P = 2,56 / 20,32 = 0,13$ с.

Дальше на нагревателе было выставлены параметры импульсов нагрева, чтобы $t_{\text{нагр}}$ получилось 0,13 с:

$$t_{\text{нагр}} = t_{\text{имп}} * N , \quad (16)$$

где $t_{\text{имп}}$ – время импульса;

N – число импульсов.

Было решено время импульса принять 0,01 с, а число импульсов 13.



Рисунок 27 – Рабочий процесс

При правильно проделанной работе калориметр нагрелся на 0,2 градуса, а на 1 градус нагрелся за 76 импульсов, т.е. при приложенной энергии в $Q_{\text{полн}} = 20,32 \cdot 0,01 \cdot 76 = 15,44$ Дж.

Из этого был сделан очевидный вывод о том, что для данных измерений нужно максимально учитывать погрешности. Поэтому продолжили испытания для того, чтобы найти теплоемкость всей калориметрической системы:

$$C_{\text{общ}} = Q_{\text{полн}} / \Delta T_{\text{эксп}}, \quad (17)$$

где $Q_{\text{полн}}$ – количество энергии, переданное калориметру с электронного блока;

$\Delta T_{\text{эксп}}$ – на сколько градусов нагрелся калориметр после нагрева с электронного блока.

В итоге получили теплоемкость калориметрической системы: $C_{\text{общ}} = Q_{\text{полн}} / \Delta T_{\text{эксп}} = 15,44 / 1 = 15,44$ Дж/К.

В итоге была получена методика определения теплоемкости всей калориметрической системы. Для ее получения нужно:

1 Задать параметры импульса нагрева: $t_{\text{имп}}$ - время импульса и N - число импульсов;

2 Рассчитать полную энергию, подходящую к калориметру с нагревателя $Q_{\text{полн}} = P \cdot t_{\text{имп}} \cdot N$, где $P = 20,32$ Вт;

3 Зафиксировать изменение температуры $\Delta T_{\text{эксп}}$;

4 Рассчитать теплоемкость калориметрической системы $C_{\text{общ}} = Q_{\text{полн}} / \Delta T_{\text{эксп}}$

3.5 Эксперимент на ускорителе

Для эксперимента на ускорителе был собран новый экспериментальный реактор-калориметр, который удовлетворял техническому заданию.

а)



б)



а) – процесс изготовления; б) – готовый прототип

Рисунок 28 – Экспериментальный реактор-калориметр

Целью эксперимента являлось доказательство большой погрешности измерения энергии электронного пучка с помощью стандартного калориметра.



Суть эксперимента заключалась в том, что воздействию электронного пучка сначала подвергался экспериментальный реактор-калориметр, а затем стандартный калориметр, после чего должны были сравниваться результаты. Под воздействием здесь подразумеваются одиночные импульсы одинаковой характеристики.

Амплитуда импульса, исходя из осциллограммы, около 500 кВ ($K_{\text{делителя}}=2366$, $K_{\text{изм}}=10$), ток 1,06 кА, длительность 0,5 мкс.

Суть эксперимента заключалась в том, что с ускорителя электронов на калориметр подавался импульс, при этом

фиксирувалось на сколько градусов нагреется калориметр и за какое время. Когда была достигнута максимальная температура подавался еще один импульс и т.д. Весь процесс эксперимента записывался на видео для более точных регистраций результатов.



Рисунок 29 -
Облучение реактора-калориметра



1 – напряжение, 2 – ток

Рисунок 30 - Осциллограмма импульса



Рисунок 31 – Процесс эксперимента

Так, на рисунке представлен график изменения температуры

экспериментального реактора-калориметра относительно окружающей среды (ΔT) с течением времени после двух импульсов. Таблица показаний в приложении А. Температура окружающей среды 21 °С.

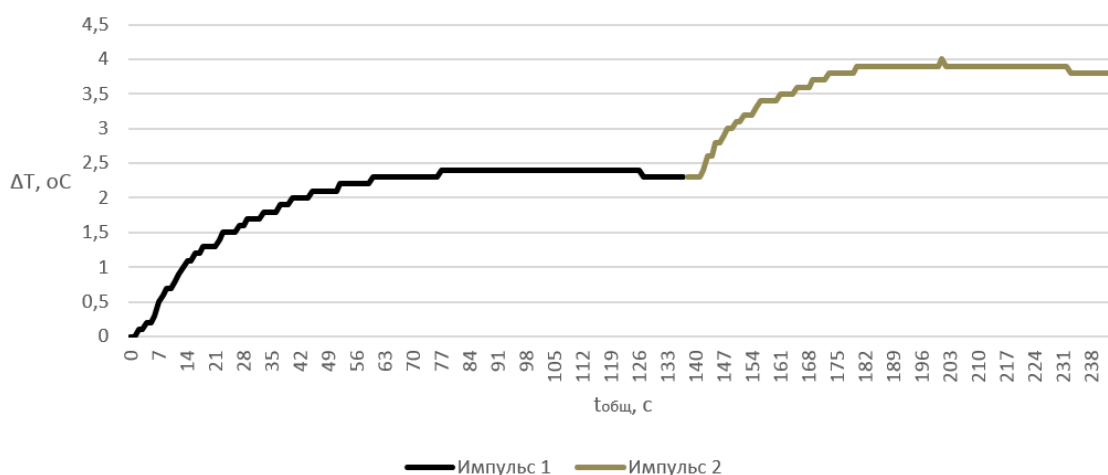


Рисунок 32 – График зависимости ΔT после серии импульсов на экспериментальном реакторе-калориметре

На следующем рисунке такой же график, но со стандартного калориметра.

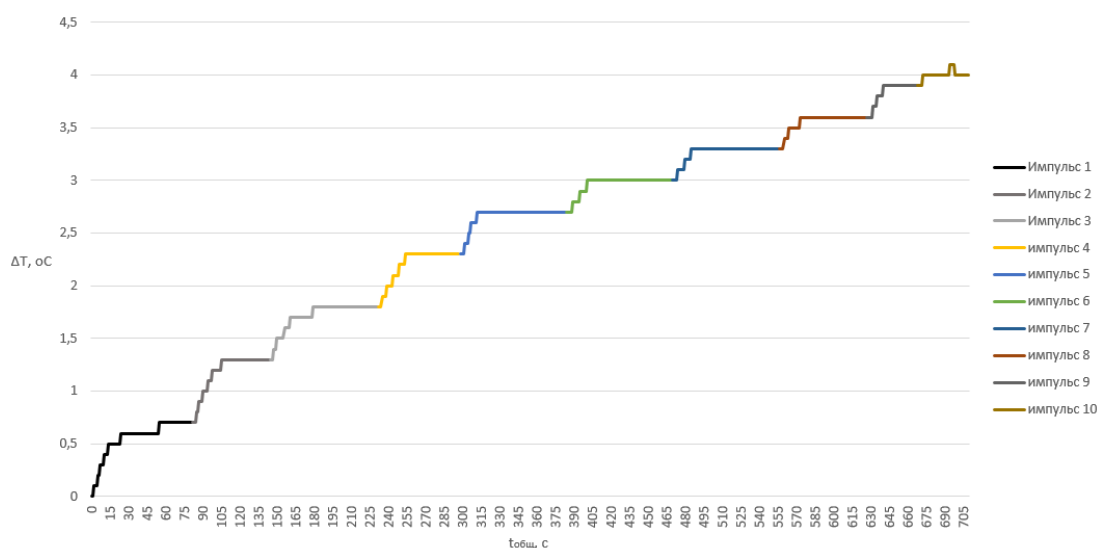


Рисунок 33 – График зависимости ΔT после серии одиночных импульсов на стандартном калориметре

По результатам эксперимента видно, что чем больше разница температуры калориметра с окружающей средой, тем погрешность нагрева калориметра увеличивается.

Был также проведен еще один эксперимент, полностью описывающий методику определения энергии импульса стандартно. Для этого на стандартный калориметр было подано сразу 10 таких же импульсов и зафиксированы показания датчика температуры.

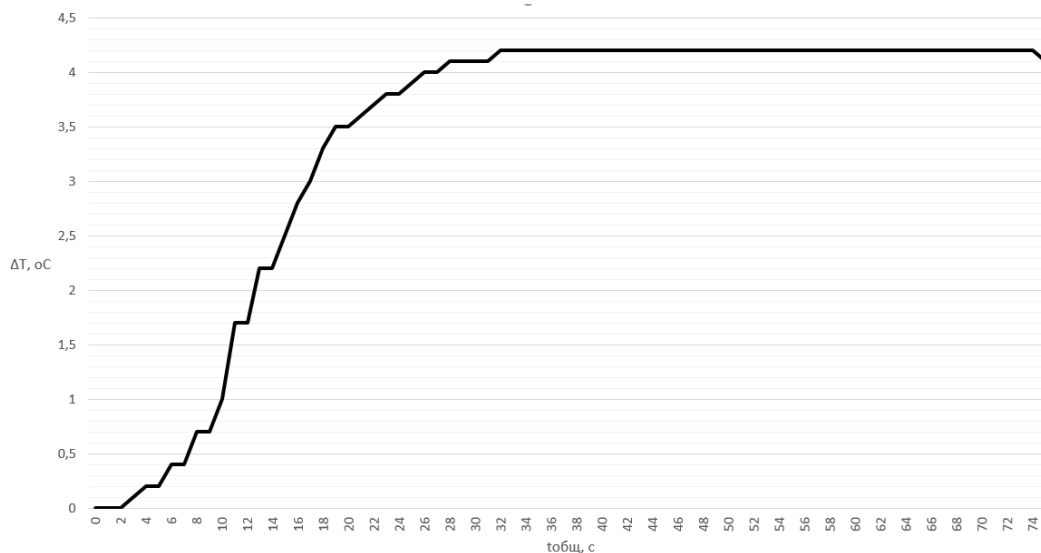


Рисунок 34 – График зависимости ΔT после 10 импульсов на стандартном калориметре

Далее по всем имеющимся данным была произведена обработка результатов исследования.

3.6 Обработка результатов

Для обработки полученных результатов сначала была определена *теплоемкость экспериментальной калориметрической системы* по уже описанному методу в пункте 3.4:

- 1 Задали параметры импульса нагрева: $t_{имп}=0,1$ с и $N=22$;
- 2 Рассчитали полную энергию, подходящую к калориметру с нагревателя $Q_{полн}=P \cdot t_{имп} \cdot N=20,32 \cdot 0,1 \cdot 22=44,7$ Дж;
- 3 Зафиксировали изменение температуры $\Delta T_{эксп}=2$ °C;
- 4 Получили теплоемкость калориметрической системы $C_{общ}=Q_{полн}/\Delta T_{эксп}=44,7/2=22,35$ Дж/°K.

Далее, исходя из графика на рисунках была рассчитана *энергия пучка для каждого импульса на экспериментальном реакторе-калориметре* и

стандартном калориметре. Пример расчета приведен для первого импульса на реактор-калориметр.

$$Q_{\text{имп ускор}} = C_{\text{общ}} \cdot \Delta T_{\text{эксп}}, \quad (18)$$

По графику зависимости ΔT после серии импульсов на экспериментальном реакторе-калориметре было определено $\Delta T = 2,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, следовательно энергия импульса с ускорителя равнялась $Q_{\text{имп.ускор}} = C_{\text{общ}} \cdot \Delta T_{\text{эксп}} = 22,35 \cdot 2,4 = 53,64 \text{ Дж}$.

Таблица 4 – Сравнительные показания разных импульсов экспериментального реактора-калориметра

№ импульса	T _о , °C	T _к , °C	ΔT, °C	Q, Дж
1	21,8	24,2	2,4	53,64
2	24,1	25,8	1,7	38

Таблица 5 - Сравнительные показания разных импульсов стандартного калориметра

№ импульса	T _о , °C	T _к , °C	ΔT, °C	Q, Дж
1	20,9	21,6	0,7	27
2	21,6	22,2	0,6	23,1
3	22,2	22,7	0,5	19.25
4	22,7	23,2	0,5	19.25
5	23,2	23,6	0,4	15.4
6	23,6	23,9	0,3	11.55
7	23,9	24,2	0,3	11.55
8	24,2	24,5	0,3	11.55
9	24,5	24,8	0,3	11.55
10	24,8	25	0,2	7.7

Видно, что чем выше разница температур калориметра и окружающей среды, тем хуже показания калориметра.

Дальше была определена энергия одного импульса стандартным методом через стандартный калориметр по формуле.

$$Q_{\text{имп}} = \frac{c_{\text{уд}} \cdot m \cdot \Delta T}{N} = \frac{0,385 \cdot 100 \cdot 4,2}{10} = 16,17 \text{ Дж}$$

Видно, что расчет таким способом далек от идеального. Разберемся почему. Дело в том, что второе начало термодинамики говорит о том, что

теплота постоянно переходит от более теплого тела более холодному. Как уже описано в литературном обзоре, было зафиксировано три способа теплообмена (теплопроводность, конвекция, излучение), и каждый из них подчиняется своему уникальному физическому процессу. Так можно представить уравнение, которое описывает механизм теплопроводности [2]:

$$Q = A \cdot \Delta T / R, \quad (19)$$

где Q – количество передаваемой тепловой энергии;

A – площадь сечения теплопроводящего тела;

ΔT – разность температур между двумя крайними точками;

R – тепловое сопротивление материала, показывающее, как сильно он замедляет теплопередачу.

В нашем случае основополагающим здесь является ΔT , которая в наших экспериментах достигала 4°C , а на практике итого 10°C . На этом и основано одно из правил калориметрии, которое гласит: «разность температуры калориметра и окружающей его среды не должна быть больше 2-3 градуса» [1] Это, отчасти, и является причиной того, что каждый последующий импульс отличается от предыдущего.

Делая вывод хочется заметить, что истинную энергию импульса электронного пучка в данных опытах можно принимать из расчетов по первому импульсу с экспериментального реактора-калориметра и стандартного калориметра. Но при расчетах эти значения оказались значительно расходящимися, у первого 53,64 Дж, а у второго 27 Дж.

Далее, чтобы оценить работу экспериментального реактора-калориметра было проведено сравнение его показаний при подаче на него энергии с ускорителя электронов и с нагревателя. Для этого на калориметр через нагревательный элемент было подано столько же энергии путем настройки времени нагрева.

$$T_{\text{нагр}} = Q_{\text{полн теор}} / P = 53,64 / 20,32 = 2,64 \text{ с.}$$

Чтобы максимально приблизить условия нагрева с нагревателя к условиям воздействия электронного пучка, было максимально быстро

передано калориметру столько же энергии, поэтому время импульса было принято 0,9 с, а число импульсов 3. Результат эксперимента отражен на графике зависимости ΔT после нагрева нагревателем на экспериментальном реакторе-калориметре.

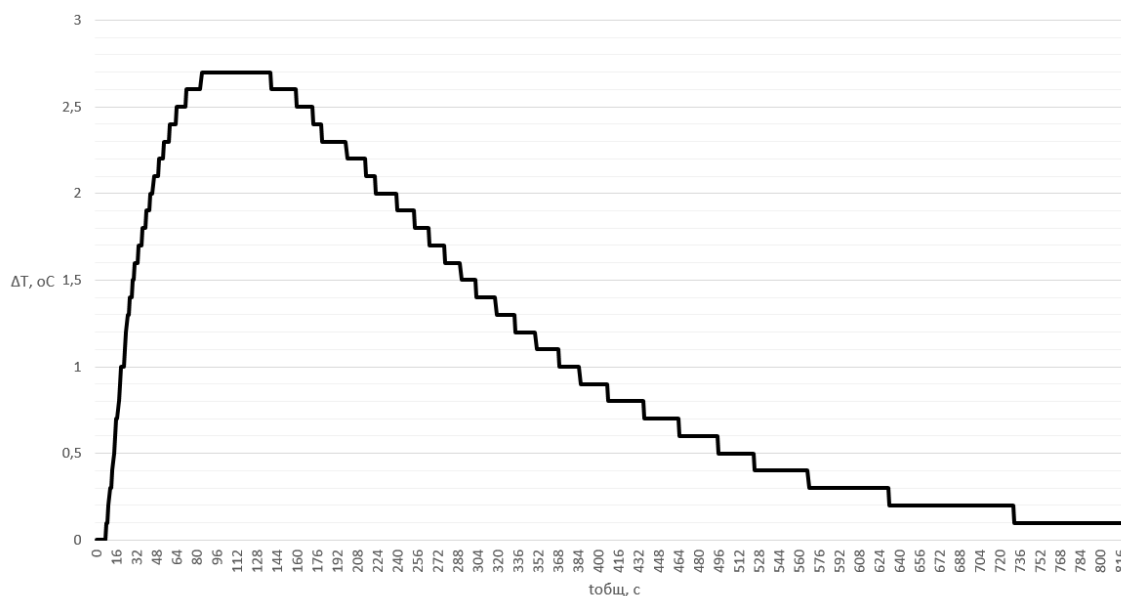


Рисунок 35 – График зависимости ΔT после нагрева нагревателем на экспериментальном реакторе-калориметре

Далее было проведено сравнение результатов полученных измерений.

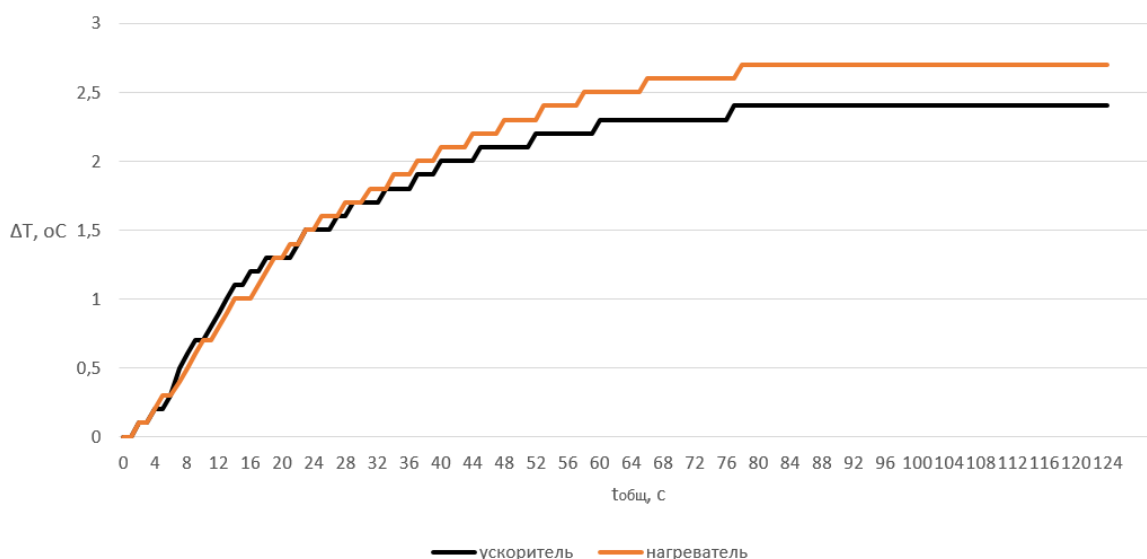


Рисунок 36 – График сравнения нагрева экспериментального реактора-калориметра электронным пучком с ускорителя и нагревателя

Из графика сравнения очевидно, что показатели схожи, значит эксперимент удался и это подтверждает, что истинное значение энергии импульса электронного пучка было получено именно с помощью с экспериментального реактора-калориметра.

Заключение

В ходе научно-исследовательской работы мною были успешно выполнены все стоящие передо мной задачи, такие как:

- литературный обзор по материалу, касающемуся калориметрических методов исследования импульсов заряженных частиц;
- испытания цифрового термометра и электронного нагревателя, предназначенного для удаленного измерения температуры и управляемого нагревания объекта измерения, который был разработан в стенах лаборатории №1 ИФВТ ТПУ;
- разработка и изготовление мишени реактора-калориметра с нагревательным элементом для определения общей теплоемкости калориметрической системы;
- разработка и испытание методики определения теплоемкости всей калориметрической системы;
- испытание реактора-калориметра на импульсном электронном ускорителе.

В ходе экспериментов на импульсном электронном ускорителе также было доказано, что при определении энергии импульса заряженных частиц в настоящее время в лаборатории № 1 ИФВТ ТПУ допускается нарушение правила калориметрии, которое гласит о том, что разность температуры калориметра и окружающей его среды не должна превышать 2–3 градуса. Также при расчетах происходит грубая ошибка, которая не учитывает теплоемкость всей калориметрической системы, а лишь часть ее в виде медной пластины. Испытания самого же реактора-калориметра прошли успешно, все показания подкреплены теоретическими и экспериментальными данными.

Дальнейшие исследования будут проводиться с целью усовершенствования прибора, путем объединения всех элементов в один корпус, настройкой подключения к персональному компьютеру с индивидуальным интерфейсом, покрытием мишени реактора-калориметра

химически неактивным материалом, либо с изменением самого материала мишени.