

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра механики многофазных систем

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

Заведующий кафедрой,

канд. физ.-мат. наук

 П.Ю. Михайлов

25 июля 2018 г.

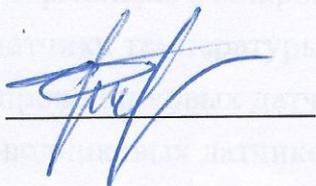
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ И
ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ РОСТА И ДИССОЦИАЦИИ ГАЗОГИДРАТОВ»

16.04.01 Техническая физика

Магистерская программа «Теплофизика в нефтегазовых и строительных
технологиях»

Выполнил работу
студент 2 курса
очной формы обучения



Филиппов Вячеслав Станиславович

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук
доцент



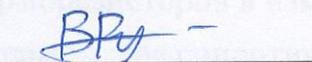
Ширшова Альбина Вольфовна

Научный консультант
канд. физ.-мат. наук



Флягин Виктор Михайлович

Рецензент
с.н.с. Института
криосферы Земли
ТюмНЦ СО РАН,
канд. физ.-мат. наук



Власов Валерий Александрович

г. Тюмень, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОГИДРАТАХ..... | 4 |
| 1.1. Определение..... | 4 |
| 1.2. Основные физико-химические свойства газогидратов..... | 5 |
| 1.2.1 Основные положения..... | 5 |
| 1.2.2. Теплофизические свойства..... | 7 |
| 1.2.3. Термодинамические свойства..... | 10 |
| 1.3. Вывод по главе 1..... | 10 |
| ГЛАВА 2. ОБЗОР РЕШЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНАЛОГОВЫХ ДАТЧИКОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ..... | 11 |
| 2.1. Термопара..... | 11 |
| 2.1.1. Преимущества термопар..... | 11 |
| 2.1.2. Недостатки термопар..... | 12 |
| 2.1.3. Проблемы измерения температуры при помощи термопар..... | 13 |
| 2.1.4. Сигнал напряжения мал..... | 13 |
| 2.1.5. Сигнал напряжения является нелинейным..... | 14 |
| 2.1.6. Компенсация эталонного спая..... | 15 |
| 2.1.7. Требования к заземлению..... | 16 |
| 2.1.8. Практические схемы с термопарами..... | 16 |
| 2.1.9. Схема подключения термопары к микроконтроллеру..... | 17 |
| 2.2. Полупроводниковые датчики температуры..... | 18 |
| 2.2.1. Преимущества полупроводниковых датчиков..... | 18 |
| 2.2.2. Недостатки полупроводниковых датчиков..... | 19 |
| 2.2.3. Принцип работы..... | 19 |
| 2.2.4. Проблемы измерения температуры при помощи полупроводниковых датчиков..... | 20 |
| температуры и способы решения..... | 20 |
| 2.2.5. Схемы подключения диодных термодатчиков к микроконтроллеру... | 21 |
| 2.3. Резистивные датчики температуры..... | 22 |
| 2.3.1. Термометр сопротивления..... | 22 |
| 2.3.2. Преимущества термометров сопротивления..... | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.3. Недостатки термометров сопротивления | 23 |
| 2.3.4. Схемы включения терморезисторов в измерительную цепь..... | 23 |
| 2.3.5 Схема подключения термометра сопротивления к микроконтроллеру | 24 |
| 2.3.6. Терморезисторы | 24 |
| 2.3.7. Преимущества терморезисторов | 25 |
| 2.3.8. Недостатки термисторов | 25 |
| 2.3.9. Схема подключения термистора..... | 26 |
| 2.3.10. Схемы подключения термисторов к микроконтроллеру | 27 |
| 2.4. Вывод по главе 2 | 29 |
| ГЛАВА 3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ | 29 |
| 3.1 Изменение конструкции реактора высокого давления | 29 |
| 3.2. Разработка схемы измерителя давления..... | 34 |
| 3.3. Разработка схемы измерителя температуры | 36 |
| 3.3.1 Определение величины падения напряжения на диоде | 37 |
| 3.4. Схема измерителя температуры | 38 |
| 3.5. Алгоритм работы программы микроконтроллера | 41 |
| 3.6. Алгоритм работы программы обработки сигналов с микроконтроллера | 43 |
| 3.7. Реализация принципиальных схем | 44 |
| 3.8. Испытания измерителя температуры..... | 47 |
| 3.9. Тестовый эксперимент по измерению давления..... | 54 |
| 3.10. Тестовый эксперимент по измерению температуры | 55 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 58 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 59 |

ВВЕДЕНИЕ

Измерение и контроль температуры являются одними из важных задач и в науке, и на производстве. Методов измерения температуры, основанных на различных физических эффектах, довольно много. Но далеко не все из них подходят для использования в конкретных устройствах в силу различных причин: габаритов и технического исполнения датчика, диапазона измеряемых температур, вида выходного сигнала, стоимости. Так, при создании блока автоматической регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов

возникла проблема постоянного контроля температуры в лабораторной установке регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов.

Цель: Усовершенствовать лабораторную установку по исследованию газогидратов и разработать систему автоматической регистрации и обработки физических параметров процесса роста и диссоциации газогидратов.

Задачи: Разработать и создать новую конструкцию реактора высокого давления, позволяющую разместить датчики температуры внутри реактора; разработать модуль съёма температуры с полупроводниковым диодом в качестве термочувствительного элемента; составить и собрать единую принципиальную схему системы автоматической регистрации и обработки физических параметров; провести эксперимент по регистрации параметров в процессе роста газогидратов.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОГИДРАТАХ

1.1. Определение

Газовые гидраты – твердые кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях из воды (водного раствора), льда, водяных паров и низкомолекулярных газов (метана, этана, пропана, азота и др.). Газовые гидраты состоят из молекул газа, заключенных в ячейки из молекул воды. Это так называемые соединения включения: молекулы воды связываются между собой водородными связями и формируют каркасы с обширными полостями внутри. Между молекулами газа и воды химических связей не образуется, они удерживаются только слабыми межмолекулярными ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями.

Внешне газогидраты напоминают мокрый спрессованный снег.

1.2. Основные физико-химические свойства газогидратов

1.2.1 Основные положения

Газовые гидраты подразделяются на техногенные (искусственные) и природные (естественные). Все известные газы при определенных давлениях и температурах образуют кристаллогидраты, структура которых зависит от состава газа, давления и температуры. Гидраты могут стабильно существовать в широком диапазоне давлений и температур. [1] Например, гидрат метана существует при давлениях от $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^3$ МПа и температурах от 70 до 350К. [2]

Некоторые свойства гидратов уникальны. Например, один объем воды при переходе в гидратное состояние связывает 207 объемов метана. При этом её удельный объем возрастает на 26% (при замерзании воды ее удельный объем возрастает на 9%). 1 м³ гидрата метана при $P = 26$ атм и $T = 0^\circ\text{C}$ содержит 164 объема газа. При этом на долю газа приходится 0,2 м³, на воду 0,8 м³. Удельный объем метана в гидрате соответствует давлению порядка 1400 атм. Разложение гидрата в замкнутом объеме сопровождается значительным повышением давления. На рисунке 1 дана диаграмма условий существования гидрата некоторых компонентов природного газа в координатах давление-температура. [1]

Для образования газогидрата необходимы следующие три условия:

1. Благоприятные термобарические условия. Образованию газогидратов благоприятствует сочетание низкой температуры и высокого давления.
2. Наличие гидратообразующего вещества. К гидратообразующим веществам относятся метан, этан, пропан, двуокись углерода и др.
3. Достаточное количество воды. Воды не должно быть ни слишком мало, ни слишком много.

Для предотвращения газогидратообразования достаточно исключить одно из этих трёх условий.

Ускоренному образованию газовых гидратов способствуют следующие явления:

1. Турбулентность. Образование газовых гидратов активно протекает на участках с высокими скоростями потока среды. При перемешивании газа в трубопроводе, технологическом резервуаре, теплообменнике и т.п. возрастает интенсивность газогидратообразования.

2. Центры кристаллизации. Центр кристаллизации представляет собой точку, в которой имеются благоприятные условия для фазового превращения – образования твердой фазы из жидкой.

3. Свободная вода. Наличие свободной воды не является обязательным условием для гидратообразования, однако интенсивность этого процесса в присутствии свободной воды значительно возрастает. Кроме того, поверхность раздела фаз вода-газ является удобным центром кристаллизации для образования газогидратов.

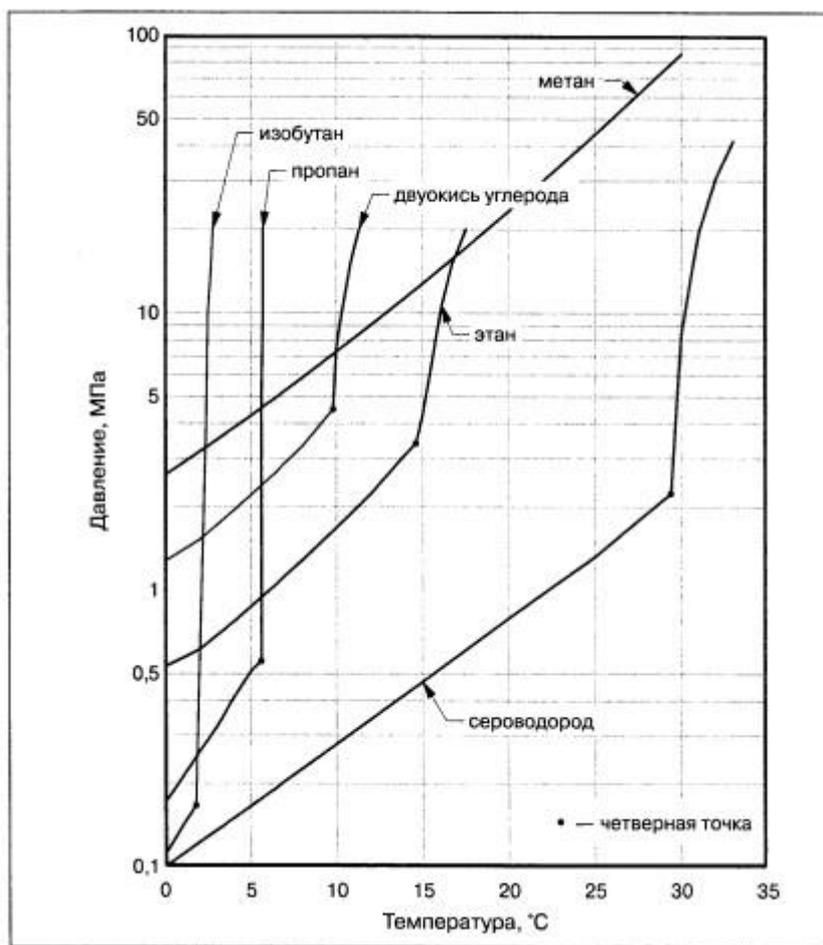


Рисунок 1. Кривые газогидратообразования для некоторых компонентов природного газа.

1.2.2. Теплофизические свойства

К теплофизическим свойствам гидратов относят теплоту гидратообразования (энтальпию диссоциации) и другие энтальпийные характеристики, а также теплоёмкости (C_p и C_v), коэффициенты теплопроводности и температуропроводности. Практическая необходимость определения этих свойств возникает при моделировании как природных, так и техногенных процессов образования или разложения газовых гидратов, а также при описании фазовых равновесий. [1]

Стандартная молярная энтальпия разложения (введенная в рассмотрение Боззо, 1975 г.) - это энтальпия разложения ΔH^0 индивидуального газового гидрата на гидратообразователь (газ или жидкость) и лед (или воду) при $T_0 = 273.15\text{K}$ и $P_0 = 0.1013\text{ Мпа}$.

Теплота гидратообразования Q_p или энтальпия разложения ΔH - это энтальпия разложения соединения $M \square n\text{H}_2\text{O}$ на чистые компоненты M и H_2O при равновесных температурах и давлениях. При таком определении ΔH - функция температуры и давления. Поскольку при гидратообразовании теплота выделяется, то Q_p (или ΔH) - положительные величины. [1]

Если имеется трехфазная система «газ-гидрат-вода», содержащая достаточно большое количество вещества в каждой из равновесных фаз, то молярной энтальпией разложения гидрата ΔH называют энтальпию перехода из гидратной фазы молей H_2O в жидкую (водную) фазу и 1 моля включенного компонента (моля газовой смеси) в газовую фазу. При этом состав каждой из сосуществующих фаз сохраняется. [1]

Когда можно пренебречь растворимостью газа в воде и воды в газе при равновесии «газ-гидрат-вода», можно использовать следующее выражение для ΔH :

$$dp = \frac{\Delta H}{VT} dT \quad (1)$$

т. е. обычное уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Здесь ΔV - изменение молярного объёма системы при гидратообразовании.

Как показали проведенные методом адиабатической калориметрии измерения, образовавшийся после разложения газового гидрата лед (при температуре ниже 273 К) заметно отличается по свойствам от обычного гексагонального льда: теплота таяния этого льда выше температуры плавления обычного льда (примерно на 20%) и монотонно увеличивается с ростом давления. Кроме того, получившийся после разложения гидрата пропана метастабильный лед имеет весьма развитую поверхность. [1]

Определение теплоёмкости производится по аддитивной схеме. При этом теплоёмкость C_p (или C_v , так как $C_p \approx C_v$) разбивается на вклады от теплоёмкости незаполненной решетки клатрата и теплоёмкости включенных молекул. Теплоёмкость незаполненной решетки полагается равной теплоёмкости льда, а теплоёмкость включенных молекул оценивается в классическом пределе.

Считается справедливым следующее соотношение (Дж/(моль·К)):

$$C_p \approx n C_{\text{незан}} + C_M, \quad (2)$$

где n – гидратное число; $C_{\text{незан}}$ – теплоёмкость незаполненной решетки; C_M – среднемолярная теплоёмкость включенных молекул:

$$C_M = \sum_i C_{Mi} x_i, \quad (3)$$

где C_{Mi} – молярная теплоёмкость i -го компонента гидратообразователя в

гидратной фазе; x_i – молярная доля i -го, включенного в гидрат, компонента ($\sum x_i = 1$).

Весьма существенно, что при достаточно высоких температурах (например, вблизи 273 К) в качестве C_{Mi} можно использовать величину $\approx 1,5 R$ для одноатомных газов, величину $\approx 2,5 R$ для двухатомных молекул, а для многоатомных молекул использовать их молярные теплоёмкости в идеальном газовом состоянии. При таком способе расчета погрешность молярной теплоёмкости гидрата C получается не более чем 2-3 %. [1]

Удельная теплоёмкость пересчитывается из молярной теплоёмкости по

следующей формуле (Дж/(кг·К)):

C

$$C_{гид} = \frac{C}{M + 0,018n} \quad , \quad (4)$$

□

где M – средняя молярная масса газа, входящего в состав гидрата, кг/моль. При

этом погрешность расчета удельной теплоёмкости оказывается порядка 5%.

Основной вклад в теплоемкость гидрата вносит водный каркас. Именно поэтому больших различий между данными разных авторов не наблюдается, например, из-за наличия в системе остаточного льда, неточного определения состава гидрата. [1]

В 1979 г. Столл и Брайан для гидратов метана и пропана обнаружили низкий коэффициент теплопроводности ($\lambda \approx 0,4$ Вт/(м·К)). Эта величина оказалась очень близкой к теплопроводности воды, но примерно в 5 раз ниже теплопроводности льда (При T около 273 К). Было найдено, что коэффициент теплопроводности возрастает с ростом температуры, а при $T \approx 260$ К он равен $\approx 0,5$ Вт/(м·К). Необычными оказались не только аномально низкие значения коэффициента λ , но и его температурная зависимость: для большинства кристаллических тел (и, в частности, для льда) при температурах выше температуры Дебая коэффициент теплопроводности убывает с ростом температуры пропорционально T^{-1} , тогда как у клатратного гидрата возрастает. Таким образом, при низких температурах ($T \approx 100$ К) различие в коэффициентах теплопроводности льда и гидрата достигает 20 раз. [1]

При уменьшении температуры и давления гидрат разлагается на газ и воду с поглощением большого количества теплоты. Разложение гидрата в замкнутом объёме либо в пористой среде (естественные условия) приводит к значительному повышению давления. [1]

Кристаллогидраты обладают высоким электрическим сопротивлением, хорошо проводят звук, и практически непроницаемы для свободных молекул воды

и газа. Для них характерна аномально низкая теплопроводность (для гидрата метана при 273 К в пять раз ниже, чем у льда). [1]

1.2.3. Термодинамические свойства

Для описания термодинамических свойств гидратов в настоящее время широко используется теория Ван-дер-Ваальса – Платтеу.

Основные положения данной теории:

1. Решётка хозяина не деформируется в зависимости от степени заполнения молекулами-гостями либо от их вида.

2. В каждой молекулярной полости может находиться не более одной молекулы-гостя.

3. Взаимодействие молекул-гостей пренебрежимо мало.

4. К описанию применима статистическая физика. [4]

Для обработки фактической информации также используют преобразованное уравнение Ван-дер-Ваальса – Платтеу:

$$\ln \frac{P}{P^*} = \frac{a}{Tb} \quad (5)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты; $P^* = 1$ МПа; T – температура в градусах Кельвина. [1]

Несмотря на успешное описание термодинамических характеристик, теория Ван-дер-Ваальса — Платтеу противоречит данным некоторых экспериментов. В частности, показано, что молекулы-гости способны определять как симметрию кристаллической решётки гидрата, так и последовательность фазовых переходов гидрата. Помимо того, обнаружено сильное воздействие гостей на молекулы-хозяева, вызывающее повышение наиболее вероятных частот собственных колебаний [3].

1.3. Вывод по главе 1

Проведя анализ основных сведений о газогидратах, а также изучив принцип работы лабораторной установки регистрации физических параметров процесса формирования

газогидратов - экспериментального стенда «Газогидраты» [3], можно прийти к следующим выводам:

- Образование, рост и исследование газогидратов происходит при отрицательных температурах и температурах близких к 0°C;

- В качестве гидратообразующего вещества в лабораторной установке используется пропан. На рисунке 1 видно, что процесс гидратообразования пропана происходит при температурах близких к 0°C.

Исходя из сказанного можно сделать следующий вывод: диапазон измерения температуры в лабораторной установке регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов будет лежать в пределах от -10°C до +5°C. Для этого диапазона необходимо спроектировать электронное устройство для измерения и контроля температуры.

ГЛАВА 2. ОБЗОР РЕШЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНАЛОГОВЫХ ДАТЧИКОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1. Термопара

Термопара (термоэлектрический преобразователь) — устройство, применяемое, в основном, для измерения температуры, представляет собой пару проводников из различных материалов, соединенных на одном конце и формирующую часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерения температуры.

2.1.1. Преимущества термопар

Температурный диапазон. В зависимости от использованного металла проводников, термопара способна измерять температуру в диапазоне от -200 до +2500 °C.

Надёжность. Термопары являются прочными приборами, невосприимчивыми к ударам и вибрации и подходящими для использования в опасных окружающих условиях.

Быстрый отклик. Благодаря небольшим размерам и низкой теплоёмкости, термопары быстро откликаются на изменения температуры, особенно если воздействию подвергается измерительный спай. Они могут реагировать на быстро изменяющуюся температуру в пределах нескольких сотен миллисекунд.

Отсутствие саморазогрева. Поскольку термопары не требуют энергии питания, они не подвержены саморазогреву.

2.1.2. Недостатки термопар

Сложная обработка сигнала. Необходима существенная обработка сигнала, чтобы преобразовать напряжение термопары в полезные показания температуры. Традиционно обработка сигнала требовала больших затрат времени, чтобы избежать привнесённых погрешностей, которые снижали точность.

Точность. Кроме внутренних неточностей в термопарах, обусловленных их металлургическими свойствами, измерение при помощи термопары является настолько точным, насколько точно может быть измерена температура эталонного спая, традиционно в пределах 1...2°C.

Подверженность коррозии. Поскольку термопары состоят из двух разнородных металлов, в некоторых окружающих условиях коррозия с течением времени может привести к ухудшению точности. Следовательно, им может потребоваться защита, а уход и техническое обслуживание являются неотъемлемыми процедурами.

Подверженность помехам. При измерении изменений сигнала на уровне микровольт, помехи от паразитных электрических и магнитных полей могут быть проблемой. Скручивание пары проводов термопары может значительно снизить наводку от магнитного поля. Использование экранированного кабеля или укладка проводов в металлический лоток и защитный экран могут снизить наводку от электрического поля. Измерительное устройство должно обеспечивать

фильтрацию сигнала либо на аппаратном, либо на программном уровне, с интенсивным подавлением частоты сети (50 или 60 Гц) и её гармоник. [5]

2.1.3. Проблемы измерения температуры при помощи термопар

Преобразовать напряжение, генерируемое термопарой, в точные показания температуры достаточно сложно по нескольким причинам: сигнал напряжения является небольшим, зависимость температуры от напряжения сигнала с термопары нелинейная, возникает необходимость компенсации эталонного спада, а также возможны проблемы с заземлением. Рассмотрим каждую проблему. [6]

2.1.4. Сигнал напряжения мал

Большинство общеупотребительных термопар относятся к типам J, K и T. При комнатной температуре их напряжение изменяется на 52 мкВ/°С, 41 мкВ/°С и 41 мкВ/°С соответственно. Другие, менее известные типы имеют даже меньший температурный коэффициент напряжения. Этот небольшой сигнал требует каскада с большим усилением перед аналого-цифровым преобразованием.

Таблица

1 сравнивает чувствительности различных типов термопар [6].

Таблица 1. Изменение напряжения в зависимости от температуры

(коэффициент термоЭДС) для различных типов термопар при 25°С

| Тип термопары | Коэффициент термоЭДС, мкВ/°С |
|---------------|------------------------------|
| E | 61 |
| J | 52 |
| K | 41 |
| N | 27 |
| R | 9 |
| S | 6 |
| T | 41 |

Поскольку сигнал напряжения является небольшим, появляется необходимость распознавания истинного сигнала из помех, собираемых выводами термопары. Выводы термопары являются длинными и часто прокладываются в электрически

зашумленном окружении. Помехи, считанные выводами, могут легко поглотить ничтожный сигнал термопары.

Чтобы выделить сигнал из помех, обычно сочетают два подхода. Первым является использование усилителя с дифференциальным входом, такого как измерительный усилитель, чтобы усилить сигнал. Вторым является низкочастотная фильтрация, которая удаляет внеполосные помехи. Низкочастотный фильтр должен удалять и радиочастотные помехи (свыше 1 МГц), которые могут вызвать выпрямление в усилителе. [6]

2.1.5. Сигнал напряжения является нелинейным

Наклон графика характеристики термопары изменяется в зависимости от температуры. Например, при 0°C выход термопары Т-типа изменяется на $39 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$, но при 100°C наклон возрастает до $47 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$.

Существуют три стандартных метода компенсации нелинейности термопары. Выбрать часть графика, которая является относительно плоской, и аппроксимировать наклон как линейный в данной области - подход, который работает особенно хорошо для измерений в ограниченном диапазоне температур. Не требуются сложные вычисления. Одной из причин, по которой термопары К- и J-типа являются популярными, является то, что они имеют большие промежутки температуры, для которых возрастающий наклон чувствительности (коэффициент термоЭДС) остаётся фактически постоянным (рисунок 2).

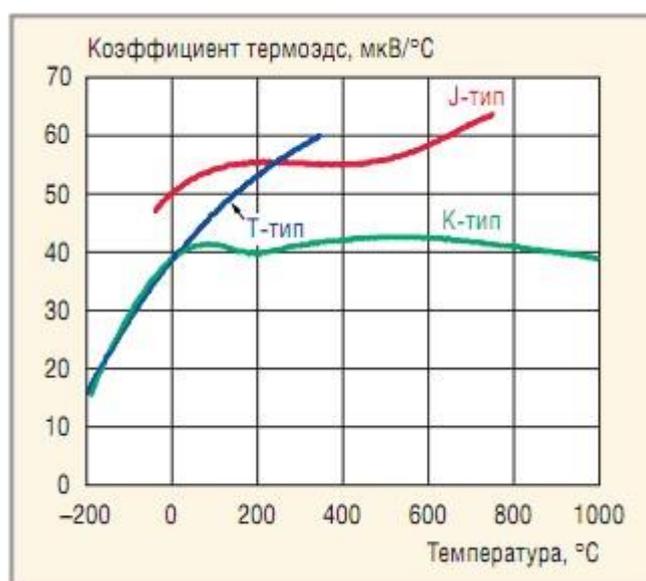


Рисунок 2. Изменение чувствительности термопары с температурой.

Другим подходом является сохранение в памяти просмотрной таблицы, которая соотносит набор напряжений термопары с её относительной температурой. Затем используется линейная интерполяция между двумя ближайшими пунктами таблицы для получения других значений температуры.

Третьим подходом является использование уравнений высокого порядка, которые моделируют поведение термопары. Хотя этот метод имеет наибольшую точность, он также является самым затратным по вычислениям. [6]

2.1.6. Компенсация эталонного спая

Температура эталонного спая термопары должна быть известной, чтобы получить точные показания абсолютной температуры. Температуру эталонного спая измеряют при помощи другого термочувствительного прибора - обычно микросхемы, термистора, диода или RTD (резистивного датчика температуры).

Отсчёт напряжения термопары затем корректируют для отображения температуры эталонного спая. Важно, чтобы эталонный спай был считан как можно более точно - с точностью датчика температуры, содержащегося при той же самой температуре, что и эталонный спай. Любая погрешность в определении температуры эталонного спая отразится на конечном отсчёте показаний термопары.

Для измерения образцовой температуры доступны различные датчики:

Термисторы. Они имеют быстрый отклик и небольшой корпус; однако они нуждаются в линеаризации и имеют ограниченную точность, особенно в широком диапазоне температур. Они также требуют тока для возбуждения, который может вызывать саморазогрев, приводящий к дрейфу. Общая точность системы в сочетании с обработкой сигнала может быть недостаточной;

Резистивные датчики температуры (RTD). Резистивные датчики температуры являются точными, стабильными и достаточно линейными, однако размер корпуса и стоимость ограничивают их применение в системах управления технологическими процессами;

Удалённые термодиоды. Это диоды, используемые для считывания температуры вблизи разъёма термопары. Формирующий кристалл

преобразовывает напряжение на диоде, которое пропорционально температуре, в аналоговый или цифровой выходной сигнал. Его точность ограничена примерно $\pm 1^\circ\text{C}$;

2.1.7. Требования к заземлению

Промышленность выпускает термопары и с изолированными, и с заземлёнными наконечниками для измерительного спая, которые приведены на рисунке 3.

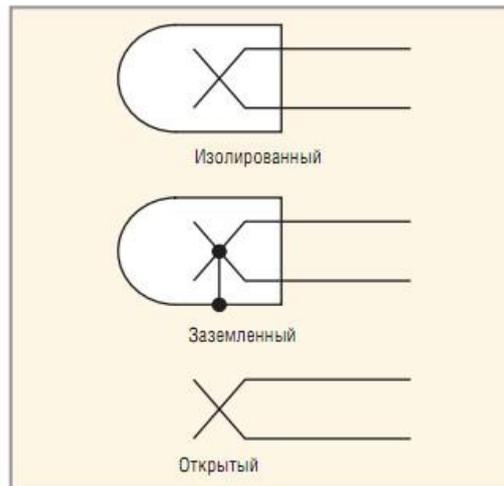


Рисунок 3. Типы измерительного спая термопары.

Обработка сигнала термопары должны быть спроектирована так, чтобы избежать петель заземления при измерении заземлённой термопарой, а также иметь контур для входных токов усилителя, когда измерение производится изолированной термопарой. Кроме того, если наконечник термопары заземлён, входной диапазон усилителя должен выдерживать любые разности в потенциалах заземления между наконечником термопары и землёй системы измерения. [6]

2.1.8. Практические схемы с термопарами

Обработка сигнала термопары является более сложной, чем обработка в других системах измерения. Ошибки в обработке сигнала, особенно в части компенсации измерительного спая, могут привести к более низкой точности.

На рисунке 4 изображена схема для измерения температуры с помощью термопары типа К. Она основана на применении усилителя термопары AD8495, который специально разработан для термопар типа К. Это аналоговое решение оптимизировано для минимального времени разработки, оно имеет простой тракт для сигнала и не требует написания кода программы.

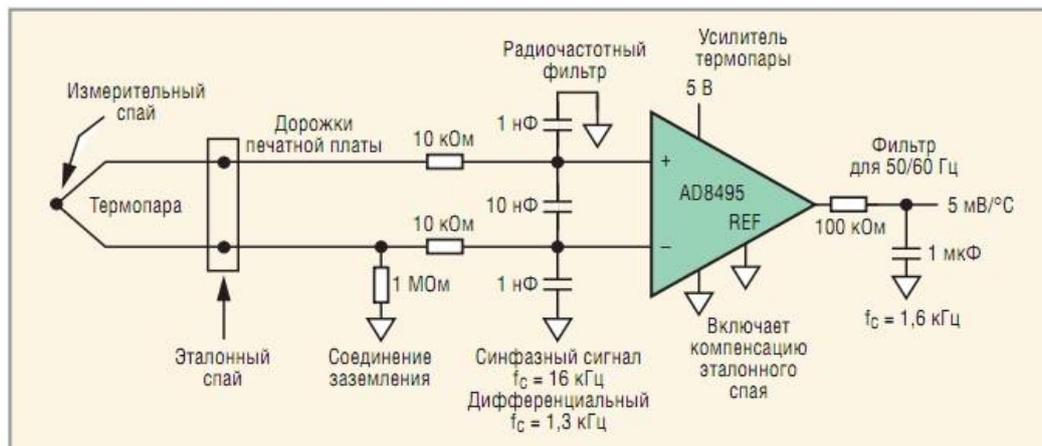


Рисунок 4. Схема для измерения температуры с помощью термопары типа К.

Данная схема решает все проблемы измерения температуры при помощи термопар.

Малый сигнал термопары усиливается AD8495 в 122 раза, обеспечивая выходную чувствительность 5 мВ/°С (200°С/В).

Высокочастотные синфазные и дифференциальные помехи удаляются внешним радиочастотным фильтром. Низкочастотные синфазные помехи подавляет измерительный усилитель AD8495. Любой оставшийся шум удаляется внешним фильтром при последующей обработке.

Компенсация эталонного спая. Усилитель AD8495, который содержит температурный датчик для компенсации изменений окружающей температуры, должен быть установлен вблизи эталонного спая, чтобы работать при той же температуре для точной компенсации эталонного спая.

Усилитель AD8495 откалиброван для получения выхода 5мВ/°С на линейном участке графика термопары К-типа, с погрешностью линейности менее чем 2°С в диапазоне температур от -25 до 400°С. Если необходим более широкий температурный диапазон, указание по применению AN-1087 от компании Analog Devices описывает, как может быть использована просмотрная таблица или уравнение в микропроцессоре для расширения диапазона температур.

2.1.9. Схема подключения термопары к микроконтроллеру

Ранее была рассмотрена аналоговая схема для измерения температуры с помощью термопары. Теперь рассмотрим схему подключения термопары к микроконтроллеру с последующим выводом информации на экран.

На рисунке 5 показана схема подключения термопары к микроконтроллеру, составленная автором [7].

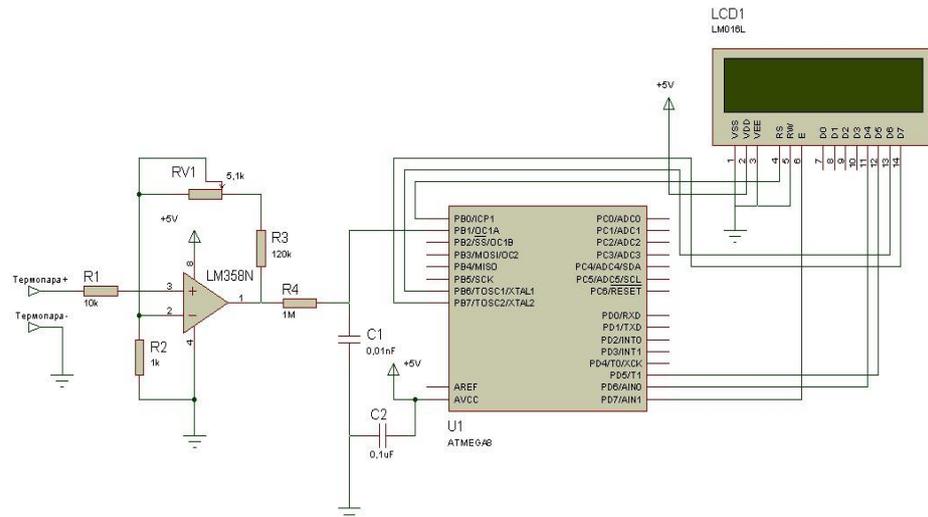


Рисунок 5. Схема подключения термопары к микроконтроллеру.

Чтобы усилить слабый сигнал с термопары, автор использовал операционный усилитель в не инвертирующем включении. Коэффициент усиления получился равен

120. [7]

При проведении эксперимента, при комнатной температуре показания на экране не совпадали с действительностью, однако при температуре 100°C датчик работал исправно. Это связано с слишком малой величиной сигнала. [7]

2.2. Полупроводниковые датчики температуры

Полупроводниковые датчики температуры (диоды, транзисторы и т.д.) предназначены для измерения температуры от -55°C до 150°C. В этот диапазон попадает огромное количество задач, как в бытовых, так и в промышленных приложениях. Благодаря высоким характеристикам, простоте применения и низкой стоимости полупроводниковые датчики температуры оказываются очень привлекательными для применения в микропроцессорных устройствах измерения и автоматики.

2.2.1. Преимущества полупроводниковых датчиков

Температурный диапазон. Полупроводниковые датчики температуры можно использовать для измерения температуры от -55° до 150°C.

Линейность температурной характеристики. Зависимость падения напряжения на р-п переходе от температуры является линейной функцией, что значительно упрощает обработку выходного сигнала с датчика.

Стабильность. Полупроводниковые датчики температуры обладают высокой стабильностью параметров при долговременном измерении температуры.

Дешевизна и доступность. Полупроводниковые датчики температуры имеют невысокую стоимость, по сравнению с другими датчиками, например, с резистивными датчиками температуры.

2.2.2. Недостатки полупроводниковых датчиков

Разброс первоначальных параметров. В связи с особенностями изготовления полупроводниковых датчиков, каждый датчик отличается от других своими первоначальными характеристиками.

Саморазогрев. В зависимости от протекающего тока, кристалл в полупроводниковом датчике может нагреваться.

2.2.3. Принцип работы

Физический принцип работы полупроводникового термометра основан на зависимости падения напряжения на р-п переходе, смещенном в прямом направлении, от температуры. Данная зависимость близка к линейной, что позволяет создавать датчики, не требующие сложных схем коррекции. В качестве чувствительных элементов на практике используются либо диоды, либо транзисторы в диодном включении (рисунок 6). Для проведения измерений, необходимо протекание стабильного тока через чувствительный элемент. Выходным сигналом является падение напряжения на датчике [8].

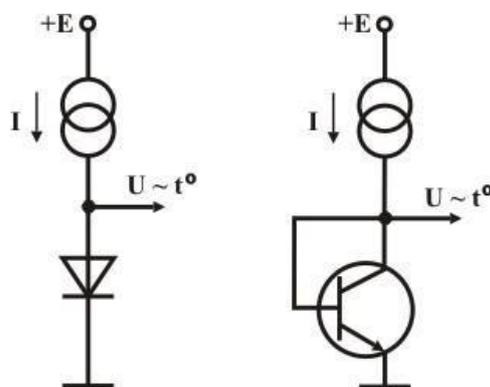


Рисунок 6. Схемы включения полупроводниковых датчиков температуры.

2.2.4. Проблемы измерения температуры при помощи полупроводниковых датчиков температуры и способы решения

Схемы, использующие одиночный р-п переход, отличаются низкой точностью и большим разбросом параметров, связанных с особенностями изготовления и работы полупроводниковых приборов. Поэтому промышленность выпускает множество типов специализированных датчиков, оснащенных цепями, устраняющими негативные особенности и значительно расширяющими функционал приборов. [8]

Для устранения всех отрицательных явлений, связанных с работой р-п перехода, используется специальная схема, содержащая в своем составе два чувствительных элемента (транзистора) с различными характеристиками [9]. Выходной сигнал формируется как разность падений напряжения на каждом чувствительном элементе. При вычитании значительно сокращаются негативные моменты. Дальнейшее повышение точности измерения осуществляется калибровкой датчика с помощью внешних цепей.

Основной характеристикой датчика температуры является точность измерений. Для полупроводниковых моделей она колеблется от $\pm 1^\circ\text{C}$ до $\pm 3.5^\circ\text{C}$. Данный параметр сильно зависит от температуры. Как правило, в суженном диапазоне от -25° до 100°C точность в полтора раза выше, чем в полном диапазоне измерений -40°C до $+125^\circ\text{C}$. Большинство аналоговых датчиков температуры, иначе называемых интегральными датчиками, содержит три вывода и включается по схеме диода. Третий вывод обычно используется для целей калибровки (рисунок 7). [9]

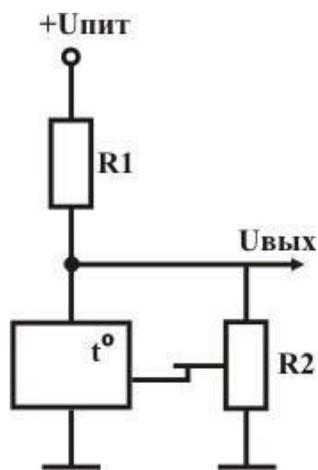


Рисунок 7. Типовая схема включения полупроводникового термометра с коррекцией.

Выходной сигнал датчика представляет собой напряжение, пропорциональное температуре. Величина изменения напряжения различна и, например, составляет 10мВ/градус. Для точного определения значения температуры необходимо знать падение напряжения при каком-либо ее фиксированном значении. Обычно в качестве такового используется значение начала диапазона измерений либо 0°C. [9]

2.2.5. Схемы подключения диодных термодатчиков к микроконтроллеру

На рисунке 8 показаны схемы подключения диодных термодатчиков к микроконтроллеру [10]:

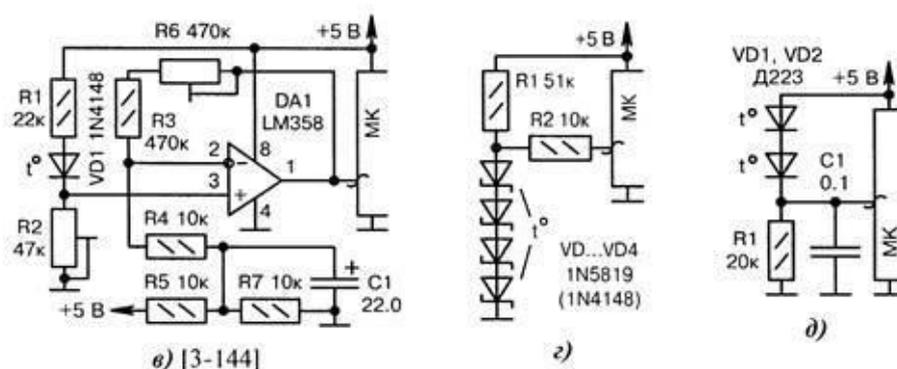


Рисунок 8. Схемы подключения диодных термодатчиков к микроконтроллеру.

в) усилитель DA1 расширяет динамический диапазон сигнала, поступающего от термодатчика на диоде VD1. Резистором R2 калибруется начальное значение, резистором R6 — диапазон температур.

г) «нижнее» включение диодов Шоттки VDI...VD4, выступающих в качестве термодатчиков. Их последовательное соединение повышает чувствительность в четыре раза. Температура определяется табличным методом по замерам напряжений АЦП микроконтроллера. Резистор R1 имеет высокое сопротивление, что снижает протекающий через термодатчики ток и устраняет их саморазогрев. Резистор обеспечивает оптимальное входное сопротивление для АЦП микроконтроллера;

д) «верхнее» включение кремниевых диодов VDI, VD2, выступающих в качестве термодатчиков. Для нормальной работы АЦП МК требуется, чтобы на вход

подавалось напряжение, близкое к питанию +5 В. Для сравнения, в схемах с «нижним» включением диодов можно подавать на вход более низкое (а значит и более стабильное) напряжение +1.2...+2.5 В от внешнего ИОН.

2.3. Резистивные датчики температуры

2.3.1. Термометр сопротивления

Термометр сопротивления — электронный прибор, предназначенный для измерения температуры. Принцип действия основан на зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов от температуры. Представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или плёнки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Следует заметить, что все металлы обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Другими словами, электрическое сопротивление проводника увеличивается при возрастании температуры [6]. Наиболее распространённые типы термометров сопротивления — платиновые и медные термометры. [11]

2.3.2. Преимущества термометров сопротивления

Высокая точность измерений. Термометры сопротивления обладают высокой точностью измерений (обычно лучше ± 1 °С), она может достигать до 0,13 тысячных °С (0,00013).

Линейность температурной характеристики. Зависимость величины электрического сопротивления от температуры является линейной функцией.

Температурный диапазон. В зависимости от использованного металла, термометр сопротивления способен измерять температуру в диапазоне от -260 до +1100 °С. Платиновые терморезисторы работают в диапазоне от -260 до +1100 °С, медные работают в диапазоне от -200 до +200 °С.

Стабильность. Термометры сопротивления обладают высокой стабильностью измерений.

2.3.3. Недостатки термометров сопротивления

Дороговизна. Термометры сопротивления имеют достаточно высокую стоимость, по сравнению с другими датчиками температуры.

Источник питания. Требуется дополнительный источник питания для задания тока через датчик.

Низкое быстродействие. Тепловая инерционность (постоянная времени) термометров сопротивления находится в пределах от десятков секунд до нескольких минут.

2.3.4. Схемы включения терморезисторов в измерительную цепь

Используется 3 схемы включения датчика в измерительную цепь:

2-проводная. В схеме подключения простейшего термометра сопротивления используется два провода. Такая схема используется там, где не требуется высокой точности, так как сопротивление проводов включается в измеренное сопротивление и приводит к появлению дополнительной погрешности.

3-проводная. Она обеспечивает значительно более точные измерения за счёт того, что появляется возможность измерить в отдельном опыте сопротивление подводящих проводов и учесть их влияние на точность измерения сопротивления датчика.

4-проводная. Является наиболее точной схемой, обеспечивает полное исключение влияния подводящих проводов. При этом по двум проводникам подается ток на датчик, два других, в которых ток равен нулю, используются для измерения напряжения на датчике. Недостаток — увеличение объёма используемого материала, стоимости и габаритов сборки.

В промышленности наиболее распространённой является трёхпроводная схема.

Для точных и эталонных измерений используется только четырёхпроводная схема.

[11]

2.3.5 Схема подключения термометра сопротивления к микроконтроллеру

На рисунке 9 показана цепь релаксационного генератора с RC-контуром и компаратором, с помощью которой формируется частота, пропорциональная изменяющейся температуре [11].

Сигнал с меняющейся частотой поступает непосредственно на микроконтроллер для оцифровки.

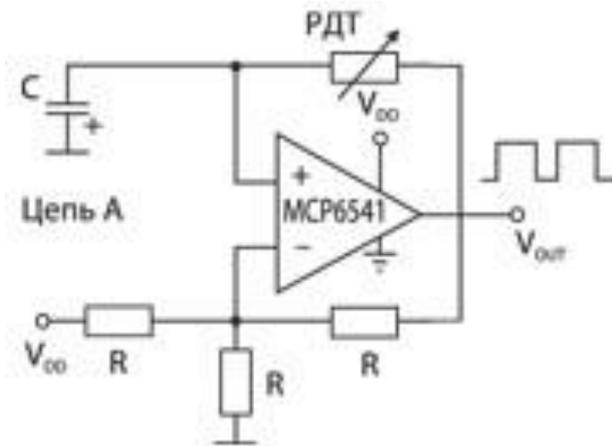


Рисунок 9. Схема подключения термометра сопротивления к микроконтроллеру.

При разработке схемы резистивного датчика температуры (РДТ) следует учесть эффект саморазогрева, вызванный рассеиванием мощности на резисторе. РДТ обеспечивают высокую степень воспроизводимости и точность измерений в широком температурном диапазоне. При оптимизации решений с РДТ следует учитывать стоимость, сложность проектирования и энергопотребление системы, состоящей из нескольких активных компонентов. [11]

2.3.6. Терморезисторы

Терморезистор — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры. Терморезисторы изготавливаются из материалов с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который обычно на порядки выше, чем ТКС металлов и металлических сплавов. По типу зависимости сопротивления от температуры различают терморезисторы с отрицательным (термисторы или NTC-термисторы, от слов «Negative temperature coefficient») и положительным (позисторы или PTC-термисторы, от слов «Positive temperature coefficient») температурным

коэффициентом сопротивления (ТКС). Для позисторов — с ростом температуры растёт их сопротивление; для термисторов — увеличение температуры приводит к падению их сопротивления. [12]

2.3.7. Преимущества терморезисторов

Температурный диапазон. Условно терморезисторы классифицируют как низкотемпературные (предназначенные для работы при температурах ниже 170 К), среднетемпературные (от 170 до 510 К) и высокотемпературные (выше 570 К). Выпускаются терморезисторы, предназначенные для работы при температурах от 900 до 1300 К.

Надёжность. Терморезисторы способны работать в различных климатических условиях и при значительных механических нагрузках.

Высокая чувствительность. Терморезисторы обладают высокой чувствительностью к изменению температуры.

Быстрый отклик. Терморезисторы обладают быстрым откликом и быстрой тепловой реакцией.

Дешевизна. Стоимость терморезисторов относительно термометров сопротивления невысока.

2.3.8. Недостатки термисторов

Изменение параметров. При долговременном использовании терморезисторы могут изменить свои исходные термоэлектрические характеристики, например, номинальное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления.

Разброс первоначальных параметров. В связи с особенностями изготовления полупроводниковых датчиков, каждый датчик отличается от других своими первоначальными характеристиками.

Нелинейность. Терморезисторы обладают нелинейностью в широком температурном диапазоне (рисунок 10).

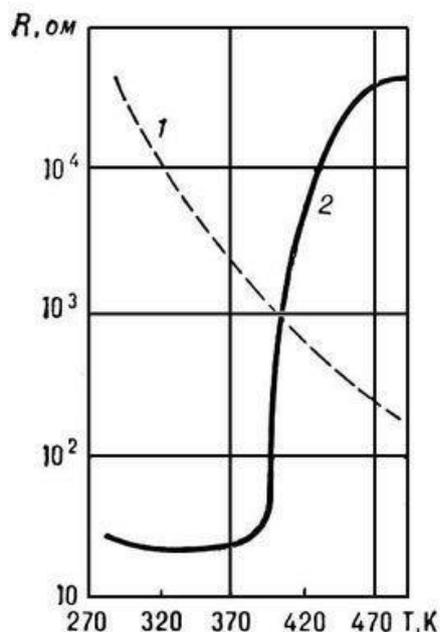


Рисунок 10. Зависимость сопротивления терморезистора от температуры (1 — ТКС < 0; 2 — ТКС > 0).

2.3.9. Схема подключения термистора

На рисунке 11 показана цепь термистора с НЧ-фильтром и усилителем, коэффициент усиления которого равен единице [12]. Назначение НЧ-фильтра, образованного R2 и C1, заключается в фильтрации шума от датчика, а усилитель используется для управления резистивными или емкостными нагрузками.

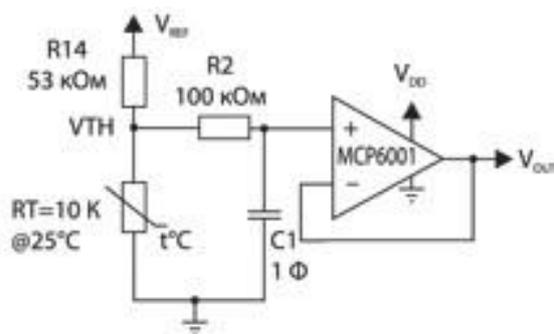


Рисунок 11. Цепь термистора с НЧ-фильтром и усилителем.

Напряжение на термисторе VTH изменяется пропорционально температуре. На рисунке 12 видно, что эта зависимость линейна в диапазоне 0...70°C, однако вне этого диапазона характеристика явно нелинейная.

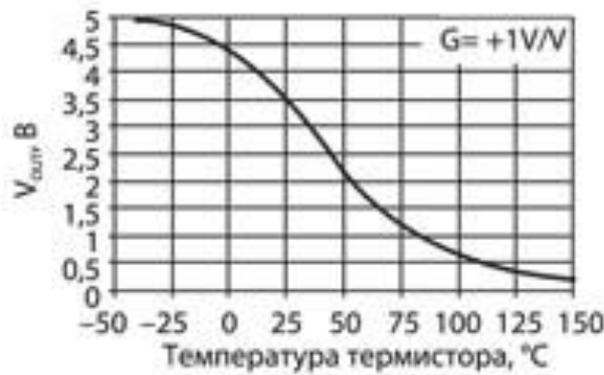


Рисунок 12. Зависимость напряжения на термисторе от температуры.

Сопротивление зависит от температуры в значительно меньшей степени, по сравнению с линейным диапазоном. Чтобы повысить разрешение измерений при очень высоких и очень низких температурах, сигнал требуется усилить. [12]

Термисторы позволяют установить точный контроль над температурой в ограниченном диапазоне. Для того чтобы обеспечить высокую точность контроля в более широком диапазоне, требуется сложная схема с несколькими каскадами усиления в разных температурных диапазонах и усилителем с программируемым коэффициентом усиления.

Общая стоимость системы с высокоточным решением увеличивается. Для термисторов следует установить ток смещения, который задается резистором R1 на рисунке 11. При больших токах разрешение измерений увеличивается, однако при этом повышается и ошибка, что вызвано саморазогревом при рассеивании мощности на термисторе. [12]

2.3.10. Схемы подключения термисторов к микроконтроллеру

На рисунке 13, а...д приведены схемы подключения термисторов к микроконтроллеру [13]:

а) базовая схема измерения температуры через АЦП микроконтроллера. Зависимость сопротивления термистора от температуры в общем случае носит нелинейный характер, поэтому используется табличный метод с заранее подобранными коэффициентами.

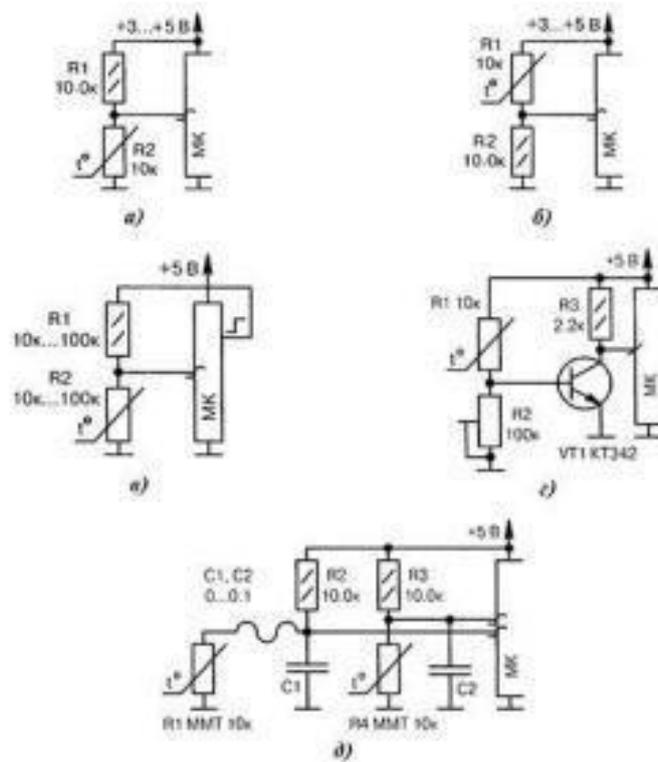


Рисунок 13. Схемы подключения термисторов к микроконтроллеру.

а) базовая схема измерения температуры через АЦП микроконтроллера. Зависимость сопротивления термистора от температуры в общем случае носит нелинейный характер, поэтому используется табличный метод с заранее подобранными коэффициентами.

б) если термистор R1 подключается к цепи питания, а не к общему проводу, то изменяется наклон зависимости напряжения АЦП от температуры в противоположную сторону;

в) измерение температуры проводится только при высоком уровне на выходе микроконтроллера, что экономит ток через делитель в ждущем режиме.

г) усилитель постоянного тока на транзисторе VT1 повышает чувствительность, но сужает температурный диапазон. Ток базы VT1 может выйти за норму при низком сопротивлении RL. Шкалу резистора размечают в градусах температуры. Микроконтроллер следит за уровнем на входе и в момент «перескока» включает внешний индикатор;

д) Микроконтроллер измеряет разность напряжений на двух делителях: R1, R2w R3, R4. Используются два канала АЦП в дифференциальном режиме. Термисторы R1 и физически устанавливают в разных местах с разной температурой окружающей среды.

2.4. Вывод по главе 2

Проведя анализ основных сведений о различных датчиках температуры, можно прийти к следующему выводу: наиболее оптимальным датчиком температуры является полупроводниковый диод так как он обладает следующими преимуществами по сравнению с другими датчиками:

- Температурный диапазон. Полупроводниковые датчики температуры можно использовать для измерения температуры от -55° до 150°C .
- Линейность температурной характеристики. Зависимость падения напряжения на р-п переходе от температуры является линейной функцией, что значительно упрощает обработку выходного сигнала с датчика.
- Стабильность. Полупроводниковые датчики температуры обладают высокой стабильностью параметров при долговременном измерении температуры.
- Дешевизна и доступность. Полупроводниковые датчики температуры имеют невысокую стоимость, по сравнению с другими датчиками, например, с резистивными датчиками температуры.

ГЛАВА 3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

3.1 Изменение конструкции реактора высокого давления

В лабораторной установке регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов возникла необходимость в измерении температуры внутри реактора высокого давления лабораторной установки. Основным элементом установки является реактор высокого давления, где в контролируемых условиях либо образуются, либо диссоциируют газогидраты. Реактор сделан из плексигласа, имеет форму цилиндра с объемом около 294 см^3 и герметизируется фланцевым соединением. Толщина стенки составляет 12 мм, что даёт возможность работать при

давлениях до 1,6 МПа. В него помещается реагент (вода, нефть, водонефтяная эмульсия и т.п.) и закачивается газ (пропан).

Размещение термочувствительных элементов внутри реактора при такой конструкции не представлялось возможным. Также возникали проблемы с герметичностью и надёжностью системы. В связи с этим, было принято решение о создании нового реактора, который должен отвечать следующим требованиям:

Высокая коррозионная стойкость. При проведении эксперимента по формированию газогидрата, стенки реактора постоянно контактируют с различными типами жидкости. Так, внешние стенки реактора контактируют с тосолом, который является теплоносителем, а внутренние стенки контактируют с водой и различными эмульсиями, необходимыми для формирования газогидрата. Поэтому все детали реактора сделаны из нержавеющей стали.

Возможность размещения термочувствительных элементов. Новая конструкция реактора должна подразумевать возможность размещения датчиков температуры внутри рабочего объёма. При этом датчики должны быть изолированы друг от друга и размещены в защитном теплопроводящем корпусе.

Работа при давлении 0.5 МПа. При формировании газогидрата, в реактор поступает газ пропан под давлением 0.5 МПа. Реактор должен быть рассчитан для работы при этом давлении.

Сохранение рабочего объёма. Новый реактор должен иметь такой же рабочий объём, какой был реализован при старой конструкции.

Герметичность. Для формирования газогидрата необходимо, чтобы было постоянное давление внутри реактора. Поэтому реактор должен быть полностью герметичен, чтобы исключить изменение давления из-за утечки газа.

Простота в обслуживании и эксплуатации. Конструкция реактора должна позволять легко извлекать газогидрат после эксперимента, проводить заправку новыми реагентами, а также чистку реактора.

В соответствии с поставленными требованиями была разработана конструкция нового реактора, представленная на рисунках 14 (а), 14 (б), 15.

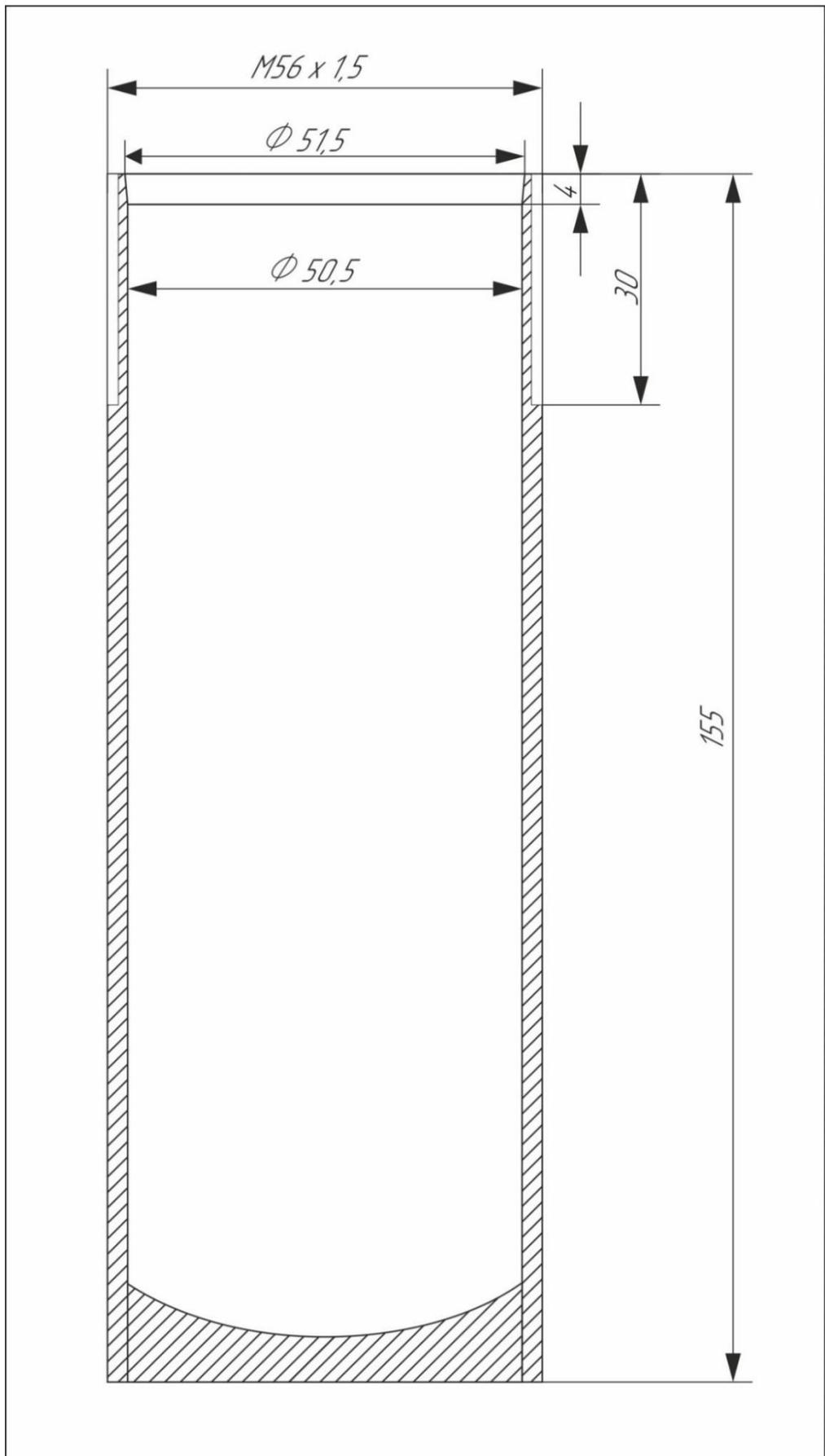


Рисунок 14 (б). Детализовка реактора

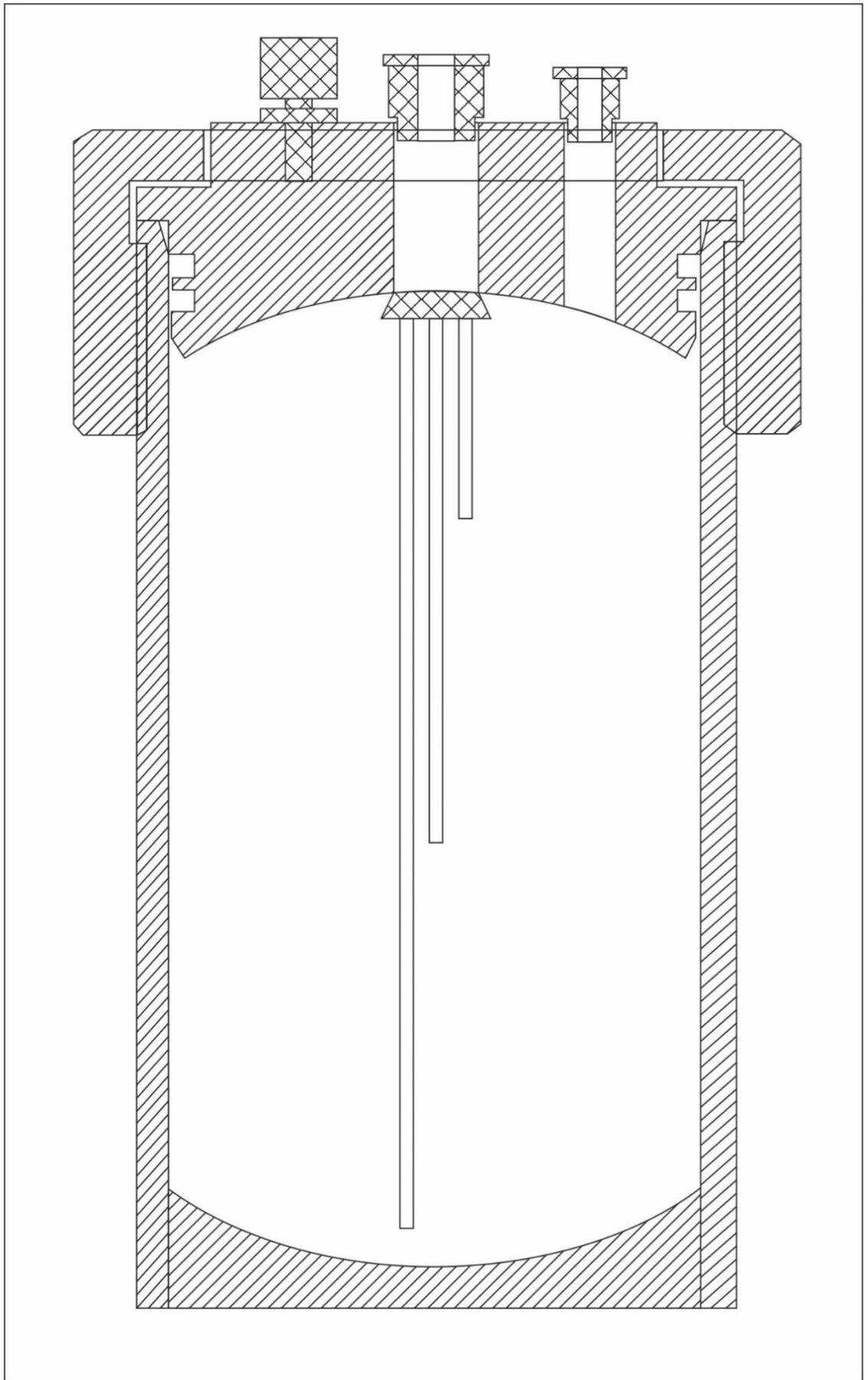


Рисунок 15. Сборочный чертёж реактора
Новый реактор состоит из нескольких основных частей:

Цилиндрический стакан. Цилиндрический стакан (рисунок 14 (б)) является основным рабочим телом реактора. Он сделан из нержавеющей стали с толщиной стенки 3 мм. Дно стакана сделано полусферической формы для равномерного распределения давления внутри реактора. В верхней части стакана на внешних стенках нарезана резьба для соединения стакана и заглушки с помощью накидной гайки для обеспечения герметичности.

Крышка. В крышке (рисунок 14 (а)) сделаны два сквозных отверстия диаметрами 6 мм и 8 мм соответственно, одно из которых служит для подведения газа в стакан, другое служит для установки термочувствительных элементов и вывода проводов за пределы реактора. С внешней стороны в эти отверстия вкручиваются фитинги для обеспечения герметичности. Нижняя часть крышки сделана полусферической формы для равномерного распределения давления. Также в крышке имеются пазы для установки уплотнительных колец, а на внешней стороне имеется клемма внешнего заземления.

Накидная гайка. Накидная гайка (рисунок 14 (а)) служит для соединения крышки и цилиндрического стакана.

Реактор был испытан при давлении в 1МПа на протяжении нескольких часов. В течении этого времени отсутствовали утечки, система доказала свою герметичность, не было выявлено никаких видимых дефектов в конструкции реактора. По результатам проверки можно сказать, что реактор пригоден к проведению экспериментов в лабораторной установке при рабочем давлении в 0.5 МПа.

3.2. Разработка схемы измерителя давления

Для оцифровки и передачи сигнала датчика давления необходимо преобразовать токовый сигнал в напряжение такого уровня, который будет достаточным для проведения аналого-цифрового преобразования. Датчик давления при рабочих давлениях от 1 до 5 атм. дает токовый сигнал до 10 мА, прямо пропорциональный величине давления.

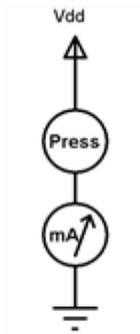


Рисунок 16. Схема включения датчика давления.

Последовательное включение датчика давления в цепь с источником питания и амперметром (либо прибором, его заменяющим, рисунок 16) накладывает ограничение на схему преобразования тока в напряжение. Сопротивление резистора, на котором проводится измерение падения напряжения при прохождении через него тока датчика, должно быть незначительным по сравнению с сопротивлением самого датчика, и не должно вносить серьезные искажения в измеряемый сигнал. С другой стороны, слишком малое сопротивление преобразователя ток-напряжение приведет к тому, что значения напряжения на нем будет сравнимо с тепловыми шумами и/или электромагнитными наводками. Поэтому в качестве преобразователя выбран резистор сопротивлением 4.7 Ом, что больше, чем сопротивление проводов и монтажа, но много меньше сопротивления датчика. Не сложно посчитать, что при таком сопротивлении резистора и протекающем через него токе 9 мА падение напряжения будет составлять 42.3 мВ.

Для оцифровки с помощью аналого-цифрового преобразователя падение напряжения на резисторе нужно усилить на такую величину, чтобы максимум напряжения достигал значения 4...5 В. Для усиления сигнала применяется операционный усилитель марки TL074 [17] по неинвертирующей схеме включения. Подстроечным резистором обеспечивается плавная регулировка коэффициента усиления данной схемы. Питание усилителя обеспечивается от биполярного блока питания, который выдаёт стабилизированное напряжение ± 15.4 В. После усиления, сигнал посылается на один из выводов микроконтроллера для дальнейшей обработки. Питание датчика давления осуществляется стабилизированным напряжением 15.4 В.

На рисунке 17 представлена принципиальная электрическая схема измерителя давления.

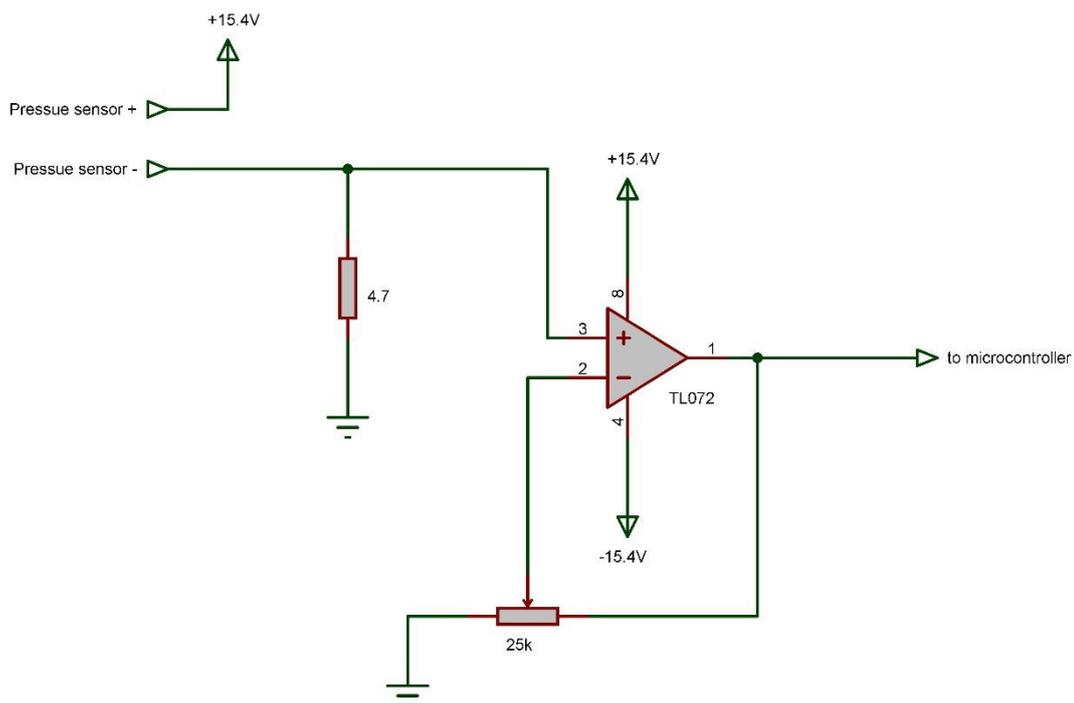


Рисунок 17. Схема электрическая принципиальная модуля измерителя температуры.

3.3. Разработка схемы измерителя температуры

Для получения возможности постоянного контроля температуры в лабораторной установке регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов необходимо электронное устройство, которое может определять величину падения напряжения на диоде, преобразовывать выходной сигнал для его дальнейшего считывания с помощью микроконтроллера с достаточным разрешением, и при этом обеспечивает питание диода постоянным током. Были сформулированы следующие технические требования для создаваемой схемы измерителя температуры:

- наличие стабилизатора тока со значением силы тока 5-30 мА для питания датчика-диода;
- возможность сдвига нуля для увеличения точности измерений;
- наличие предварительного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления для усиления слабого сигнала с датчика-диода;

- аналого-цифровое преобразование усиленного сигнала с возможностью последующего вывода на компьютер.

В соответствии с поставленными требованиями была разработана схема измерителя температуры с полупроводниковым диодом КД103Б в качестве измерителя температуры.

3.3.1 Определение величины падения напряжения на диоде

Для определения величины падения напряжения на измерительном элементе диоде в данном диапазоне температур, необходимо найти температурную зависимость падения напряжения на диоде. На рисунке 18 представлены вольтамперные характеристики диода при различных температурах [14].

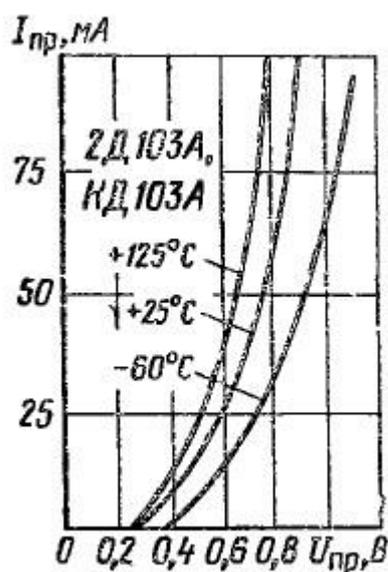


Рисунок 18. Вольт-амперная характеристика диода.

Для получения температурной зависимости в нашем диапазоне необходимо провести экстраполяцию зависимости в необходимый температурный диапазон. Для этого на рисунке 2 при определённой величине тока, например, равной 25 мА, необходимо найти значения напряжения при данных температурах и построить график зависимости (рисунок 19).

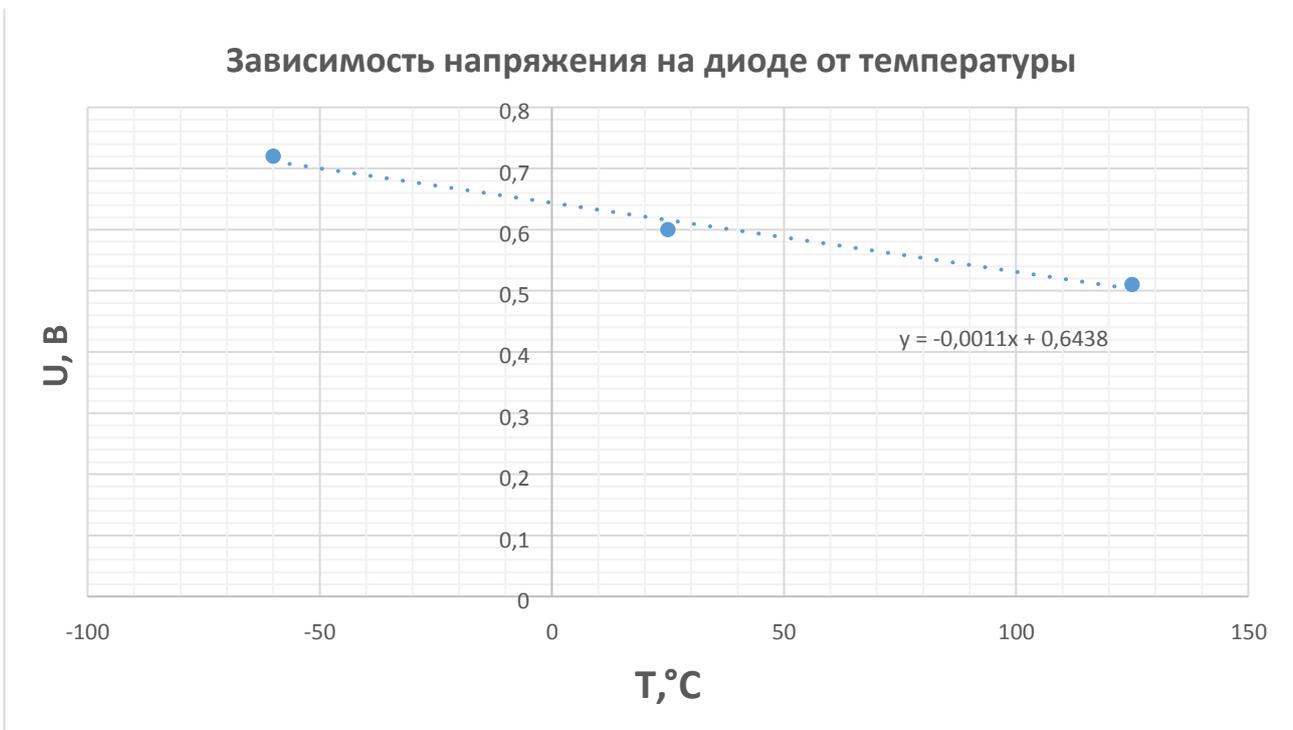


Рисунок 19. Зависимость напряжения на диоде от температуры Из рисунка 19 видно, что в необходимом диапазоне температур, напряжение меняется в пределах от 0,63 до 0,65 В.

3.4. Схема измерителя температуры

Рассмотрим схему и принцип работы измерителя температуры подробно. Для удобства представления информации о температуре было решено применить связку микроконтроллер – компьютер. Встроенный в микроконтроллер аналого-цифровой преобразователь позволяет измерять поданные на его вход величины напряжения с определенным шагом, который зависит от разрядности преобразователя, и величины его опорных напряжений, задающих границы преобразования. Использование цифрового представления позволяет избавиться от человеческого фактора, присущего аналоговым индикаторам, при проведении измерений.

При выборе микроконтроллера исходили из следующих соображений:

- наличие встроенного блока АЦП;
- разрядность АЦП минимум 10 бит;
- возможность регулировки опорных напряжений АЦП;
- наличие портов ввода-вывода для обеспечения связи с компьютером по протоколу RS-232;

- простота и достаточная наполненность подпрограммами и командами языка программирования;
- доступность средств проектирования и отладки на разных стадиях разработки устройства.

Одним из вариантов, удовлетворяющих всем требованиям, является семейство микроконтроллеров PIC16F8xx компании Microchip. Поэтому для дальнейшей работы выбрали широко распространенный, проверенный временем, качественный микроконтроллер PIC16F877[15]. Он обладает 10-битным аналого-цифровым преобразователем с 8 линиями ввода, две из которых могут быть сконфигурированы как входы минимального и максимального опорных напряжений.

Узел формирования тактовой частоты собран на параллельном кварцевом резонаторе на 20 МГц, зашунтированном для повышения стабильности частоты двумя керамическими конденсаторами емкостью 33 пФ каждый. Так как микроконтроллер имеет встроенный таймер отложенного запуска исполнения программы, дополнительной схемы формирования сигналов для вывода MCLR не требуется, и он подключен напрямую к линии питания микроконтроллера.

Для работы микроконтроллера необходимо стабилизированное напряжение величиной 5 В, поэтому для получения такой величины напряжения был установлен интегральный линейный стабилизатор напряжения 7805. Он обеспечивает стабилизацию напряжения с относительной погрешностью не более $\pm 4\%$, и, в отличие от импульсных стабилизаторов напряжения, за счет особенностей внутренней структуры не имеет значительных пульсаций на выходе [16]. Для фильтрации выбросов напряжения, свойственных таким стабилизаторам при включении или выключении питания, вход и выход интегральной схемы зашунтирован керамическими конденсаторами C1 и C2 емкостью 1 мкФ каждый. Максимальная величина силы тока 1 А обеспечивается с применением дополнительного теплорассеивающего радиатора. Указанная сила тока обеспечивает более чем 10-кратный запас по питанию всего устройства.

В лабораторной установке регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов процесс формирования газогидратов сопровождается поддержанием температур, близких к 0°C . При таких температурах, величина напряжения, выдаваемого полупроводниковым диодом КД103Б, не превышает 0.7 В (рисунок 18). Было принято решение сделать «сдвиг» диапазона выходного напряжения диода. «Сдвиг» проводился при температуре окружающей среды $+30^{\circ}\text{C}$ таким образом, чтобы на вход микроконтроллера приходило напряжение 0 В. Это необходимо для того, чтобы выставить «нулевую» точку отсчёта напряжения с полупроводникового диода при той температуре, которая не используется при проведении эксперимента. Таким образом, при рабочей температуре около 0°C на микроконтроллер будет приходиться ненулевое значение напряжения. Величина «сдвига» при этом составила -0.65 В. Для выставления величины сдвигового напряжения применяется операционный усилитель марки TL074 [17] по инвертирующей схеме включения. Он обладает четырьмя каналами, высоким диапазоном питающего напряжения от 6 до 36 В, а также низким уровнем шумов. Питание усилителя обеспечивается биполярного блока питания, который выдаёт стабилизированное напряжение ± 15.4 В. Подстроечным резистором можно более точно выбрать величину «сдвига».

Чтобы более точно получить значение падения напряжения на диоде, на выход диода подключается операционный усилитель марки TL074 [17] включенный по схеме повторителя. Это обеспечивается тем, что вход операционного усилителя не потребляет тока и имеет бесконечно малое сопротивление.

Для «сдвига» выходного напряжения с диода необходимо суммировать полученное напряжение с диода и величину «сдвига», значение которого составляет -0.65 В. Для суммирования применяется операционный усилитель марки TL074 [17] включенный по схеме сумматора. Питание сумматора обеспечивается биполярного блока питания, который выдаёт стабилизированное напряжение ± 15.4 В.

Чтобы падение напряжения на диоде укладывалось в необходимый диапазон между 2.5 и 5 В, необходимо усилить сигнал, получаемый с выходов сумматора: без усиления величина напряжения не превышает 1 В. Для усиления сигнала применяется

операционный усилитель марки TL074 [17] по неинвертирующей схеме включения. Подстроечным резистором обеспечивается плавная регулировка коэффициента усиления данной схемы. Питание усилителя обеспечивается от биполярного блока питания, который выдаёт стабилизированное напряжение ± 15.4 В. После усиления, сигнал посылается на один из выводов микроконтроллера для дальнейшей обработки. Питание термочувствительного элемента-диода осуществляется стабилизатором тока на базе полевого транзистора BSS84P [18]. В схеме включения стабилизатора тока на базе полевого транзистора, выходной ток зависит от сопротивления подстроечного резистора, включенного между истоком полевого транзистора и анодом термочувствительного элемента-диода. Подстроечным резистором можно выставить нужное нам значение тока. Питание полевого транзистора BSS84P осуществляется постоянным напряжением величиной $+15.4$ В. На рисунке 20 представлена принципиальная электрическая схема модуля измерителя температуры.

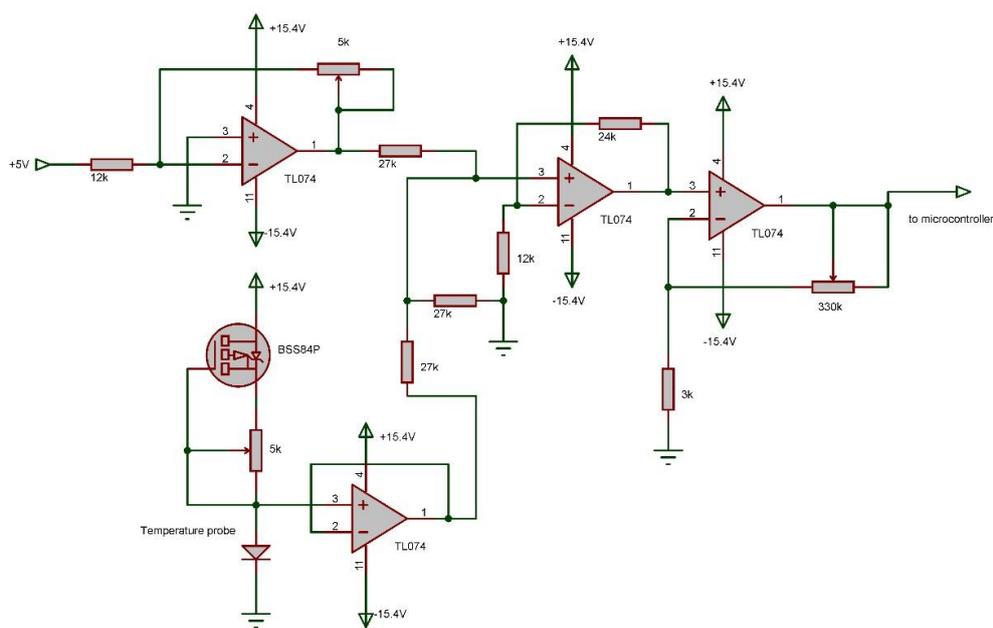


Рисунок 20. Схема электрическая принципиальная модуля измерителя температуры.

3.5. Алгоритм работы программы микроконтроллера

Выполнение операции аналого-цифрового преобразования, вывод результата на дисплей, выдерживание временных интервалов между измерениями температуры обеспечивается программой микроконтроллера.

Программа выполняется в бесконечном цикле, который прерывается только при отключении питания микроконтроллера. После включения питания происходит стабилизация тактовой частоты микроконтроллера в течение небольшого промежутка времени, определяемого встроенным блоком задержки запуска микроконтроллера. Когда частота стабилизировалась, микроконтроллер инициализирует внутренние аппаратные блоки, в том числе АЦП. Настройка аналого-цифрового преобразователя сводится к выбору количества линий ввода-вывода, которые будут использоваться для ввода аналогового сигнала, и определения линий подключения верхнего и нижнего опорных напряжений. После этого микроконтроллер начинает исполнять запрограммированный в его память программный код. После установки первоначальных значений внутренних регистров, определения режимов работы аппаратных блоков, и направления передачи данных по линиям ввода-вывода, микроконтроллер переходит к вложенному циклу, в котором ожидает команды с компьютера о начале цикла.

После получения команды, программа запускает аналого-цифровое преобразование сигналов, поданных на выходы RA0, RA1, RA2, RA5, RE0, RE1, RE2 микроконтроллера. После получения результата преобразования, микроконтроллер подготавливает данные для вывода. Затем информация о текущей температуре выводится на компьютер, и микроконтроллер снова переходит во вложенный цикл ожидания.

Рассмотренная архитектура программы позволяет выполнять измерения со строго выдерживаемым интервалом в 1 секунду. Такое значение временного интервала выбрано по аналогии с цифровыми интегральными датчиками температуры, в которых интервал измерения равен 1 секунде. Значения этого интервала хватает с запасом для многих теплофизических измерений, так как в большинстве случаев измеряется температура массивных по сравнению с датчиком тел, и она довольно медленно меняется с течением времени из-за большой теплоемкости. Однако при необходимости существует возможность программно увеличить частоту опроса датчика температуры как минимум до 800 измерений в секунду. Программа написана на языке программирования Proton PicBasic [20], текст программы вынесен в Приложение А.

3.6. Алгоритм работы программы обработки сигналов с микроконтроллера

Программа обработки сигналов принимает результаты аналого-цифрового преобразования микроконтроллера в цифровом виде и отображает их на экране компьютера. Связь между компьютером и микроконтроллером осуществляется при помощи протокола передачи данных RS-232. При использовании протокола RS-232, информация передается по проводам с уровнями сигналов, которые отличаются от стандартных 5В, что обеспечивает большую устойчивость к помехам. Сигнальные выводы RX, TX микроконтроллера подключены к преобразователю типа USB-UART марки PL2303 HX, который в свою очередь соединяется с компьютером посредством кабеля USB.

Программа находится в ожидании сигнала о начале обработки информации с микроконтроллера. При получении сигнала, программа начинает опрос сигнальных выводов микроконтроллера, при этом следит за количеством полученных байт информации. Как только с микроконтроллера поступает сигнал объёмом 15 байт, программа сохраняет полученные значения в буфер обмена и стирает текущие значения полученной информации, тем самым осуществляя подготовку к следующему потоку информации. При этом программа проверяет возможное поступление сигнала о прекращении работы программы. Если данного сигнала нету, результаты аналого-цифрового преобразования микроконтроллера выводятся из буфера обмена на экран компьютера.

Интерфейс программы представлен следующими элементами:

Кнопка Connect. Нажатием на эту кнопку осуществляется соединение с микроконтроллером. После нажатия можно выбрать основные настройки передачи данных по интерфейсу RS-232, такие как номер порта компьютера, к которому подключен микроконтроллер, скорость передачи данных, количество битов информации, чётность и управление потоком данных.

Кнопка Start. После нажатия на эту кнопку, программа обработки получит сигнал к началу опроса сигнальных портом микроконтроллера. При этом появится кнопка Stop, нажатие на которую приведёт к остановке программы обработки.

Кнопка Save. Кнопка Save предназначена для сохранения полученной информации в отдельный текстовый файл для дальнейшей обработки и построения графиков.

Программа написана в открытой среде разработки программного обеспечения Lazarus на языке Object Pascal, текст программы вынесен в Приложение Б.

3.7. Реализация принципиальных схем

После разработки принципиальной схемы измерителей давления и температуры необходимо было реализовать данные схемы на печатной плате. При создании данной платы было принято решение о модульном исполнении, которое включало в себя несколько элементов:

Общая плата. Общая плата изготавливалась из двустороннего фольгированного текстолита путём нанесения трассировки на фольгу с обеих сторон платы. Использование обеих сторон платы делалось для того, чтобы исключить пересечение токопроводящих дорожек. Также на плате предусмотрены разъёмы для подключения модулей, место для размещения микроконтроллера, разъёмы для подключения датчиков давления и температуры, разъёмы для подведения питающего напряжения с биполярного блока питания, а также разъём для подключения сигнальных выводов микроконтроллера к компьютеру. Разъёмы являются универсальными, к одному разъёму можно подключить как модуль измерения давления, так и модуль измерения температуры. Трассировка разрабатывалась исходя из схемы подключения микроконтроллера (рисунок 21) и изображена на рисунке 22.

Модули давления и температуры. Модули были сделаны на одностороннем фольгированном текстолите и имеют разъём для подключения к общей плате. С помощью этого разъёма осуществляется подведение питающего напряжения на модуль, а также связь между микроконтроллером и модулем. Трассировка разрабатывалась исходя из принципиальной электрической схемы модулей (рисунки 17,20) и изображена на рисунках 23,24.

Основными особенностями модульной системы являются:

- возможность заменить любой из модулей при возникновении неисправностей;
- возможность подключить несколько датчиков;
- универсальность;
- простота и компактность.

Разработанная и собранная плата была помещена в металлический корпус, в котором также размещается блок питания. На лицевой панели расположена кнопка включения и индикаторный светодиод. На задней панели расположены разъёмы для подключения датчиков температуры и давления, USB-разъём для подключения блока к компьютеру, розетка для подключения сетевого шнура. Корпус находится под заземлением для обеспечения безопасности работы персонала.

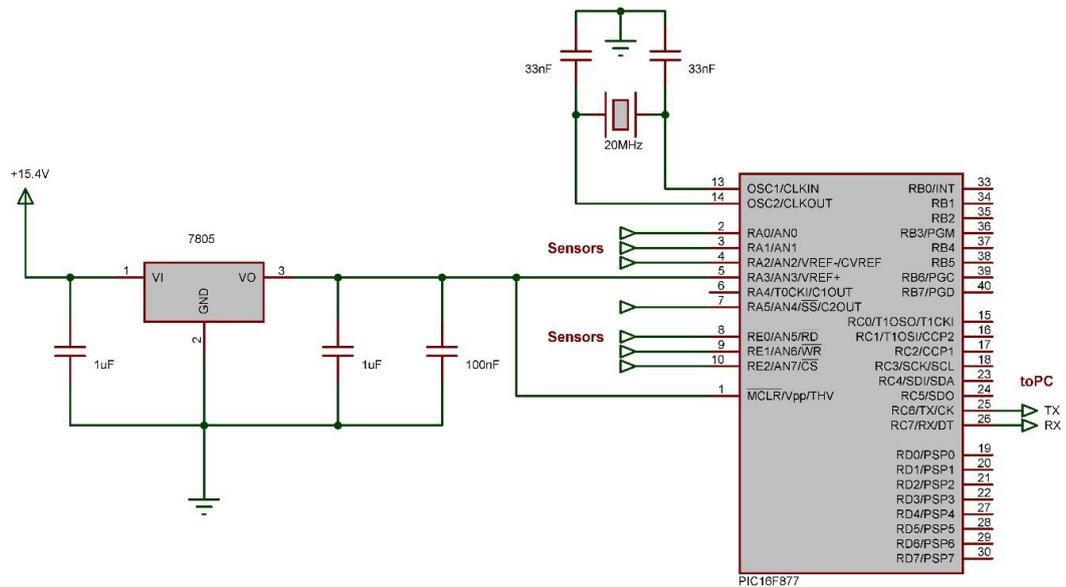


Рисунок 21. Схема подключения микроконтроллера.

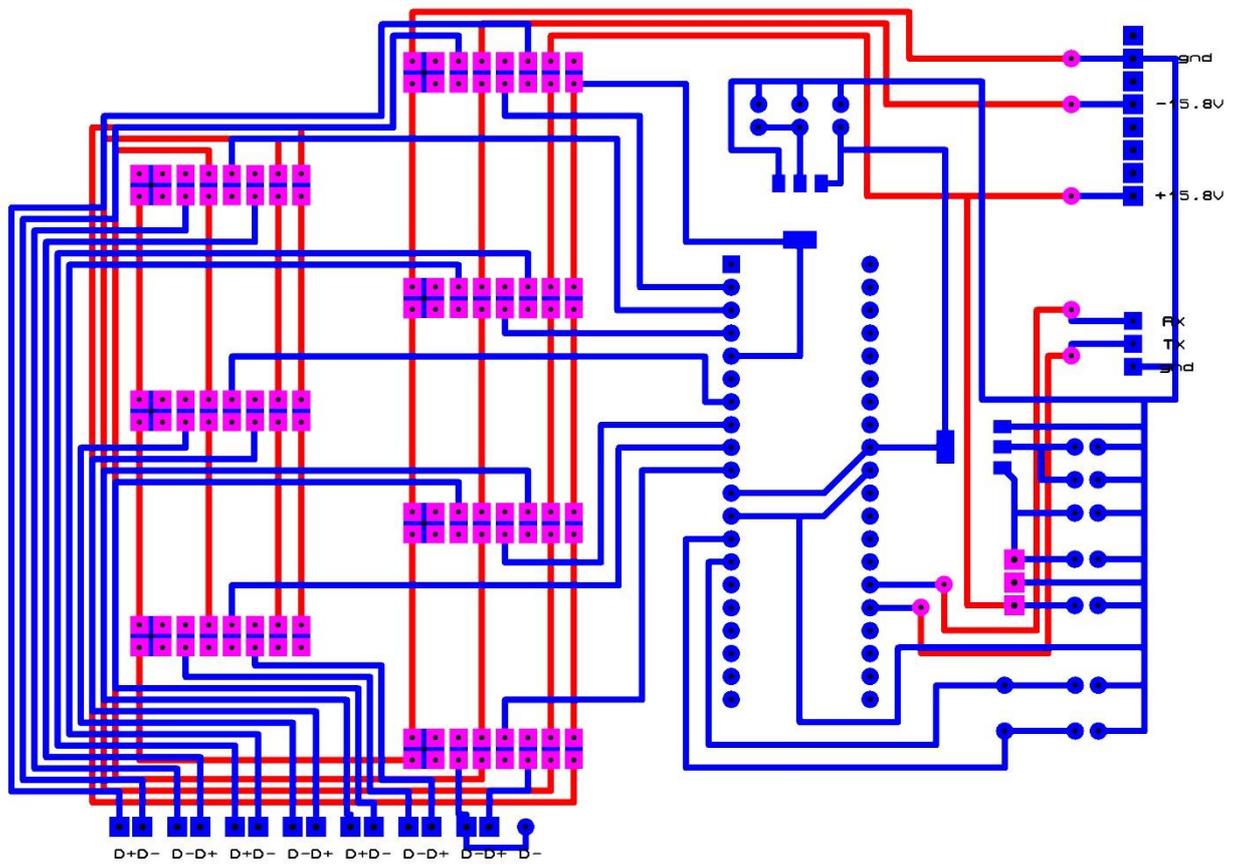


Рисунок 22. Трассировка общей платы.

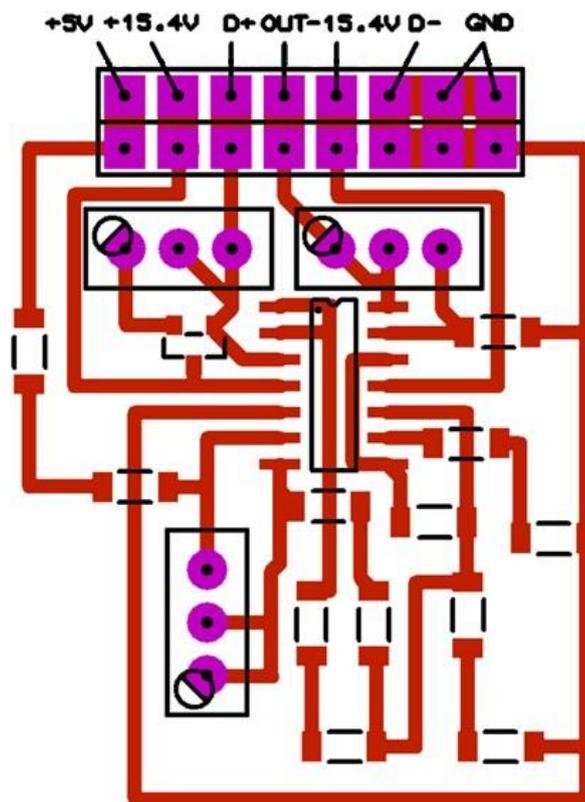


Рисунок 23. Трассировка модуля температуры

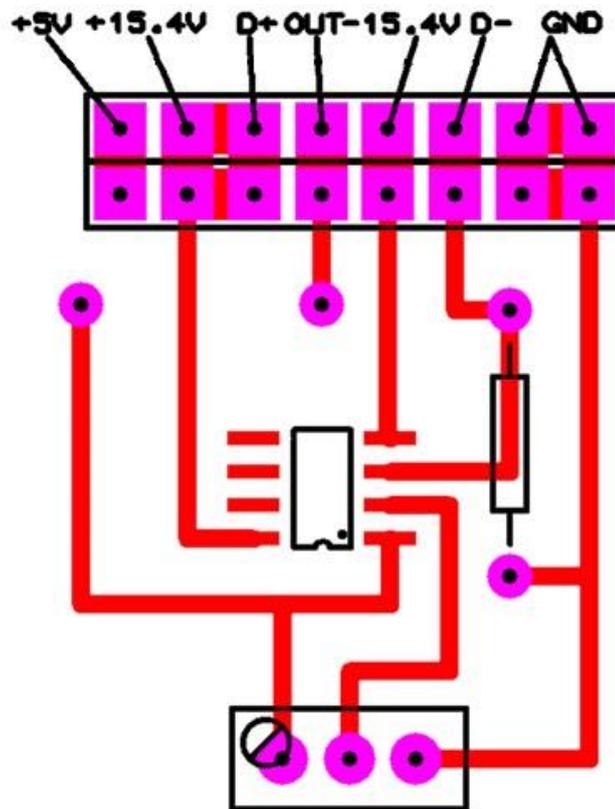


Рисунок 24. Трассировка модуля давления

3.8. Испытания измерителя температуры

Для получения экспериментальной зависимости падения напряжения на диоде от его температуры необходимо с высокой точностью задавать и контролировать температуру диода. Одним из наиболее оптимальных вариантов в данном случае является применение жидкостного термостата. Измерения проводили, используя жидкостный криотермостат на тосоле марки ТЖ-ТС-01. Данная модель позволяет контролировать температуру термостатирования от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Согласно паспорту прибора, погрешность измерений составляет $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследование зависимости падения напряжения на диоде от его температуры проводили в следующей последовательности: диоды, расположенные внутри капилляров из нержавеющей стали, погружали в тосол так, чтобы капилляры полностью находились в тосоле. Таким образом уменьшалось влияние теплопроводности стали, часть которой находилась при комнатной температуре.

После погружения диоды выдерживали в тосоле около минуты для стабилизации температуры, и только после этого начинали съем данных. Автоматика термостата поддерживала необходимую температуру в течение всего эксперимента.

Исследовали стабильность показаний температурного измерителя с диодом марки КД103Б следующим образом: в течение 5 минут для каждой из предварительно выставленных температур в диапазоне от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ записывали показания каждые 30 секунд. Так как точка замерзания воды представляет большой интерес для дальнейшего применения измерителя, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ провели две серии замеров: первый эксперимент длился 20 минут с интервалом между измерениями в 1 минуту, второй длился 6 часов с интервалом между замерах в 20 минут. По полученным данным были построены графики, отражающие стабильность процесса измерения температуры (на рисунках 25 и 26 – для $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, на рисунке 27 – для диапазона от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, на рисунке 28 – для диапазона от $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Видно, что с учетом статистического разброса показаний, в среднем значение напряжения остается одинаковым во времени для всех исследованных диапазонов. Неизменность (с учетом погрешности) показаний измерителя на протяжении длительного времени позволяет использовать его в дальнейшем для измерения и контроля температуры в реакторе установки по исследованию формирования и диссоциации газогидратов, эксперимент в которой проводится при температурах около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении суток и более.

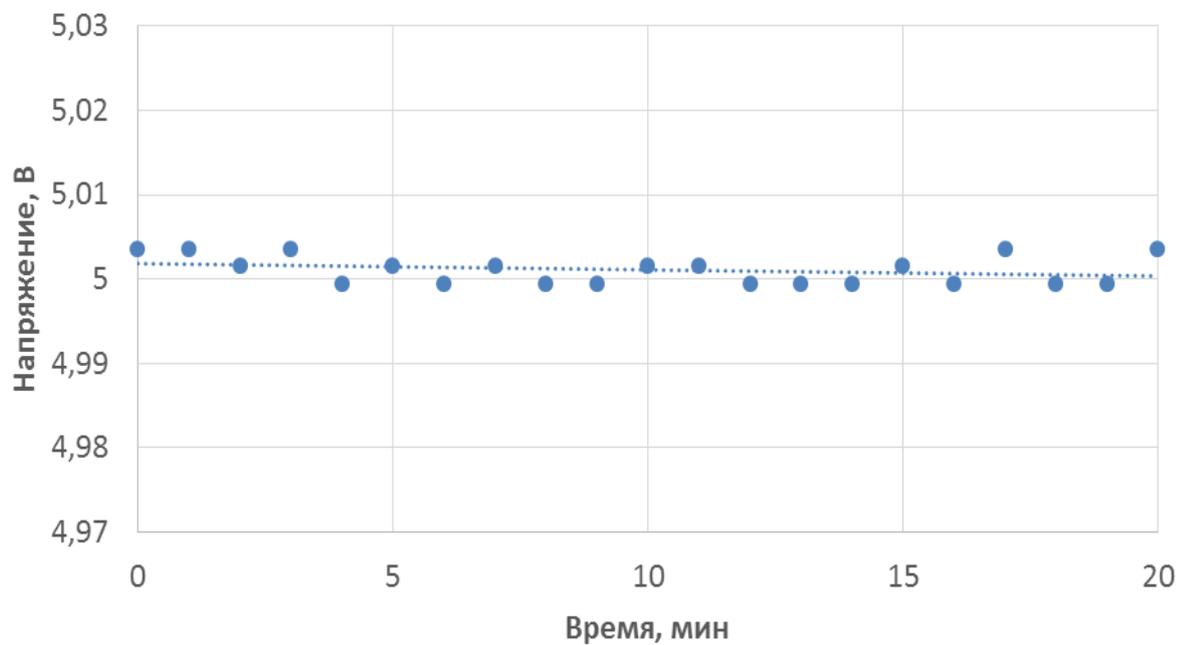


Рисунок 25.График стабильности процесса измерения температуры с помощью диода для 0 °С в течении 20 минут.

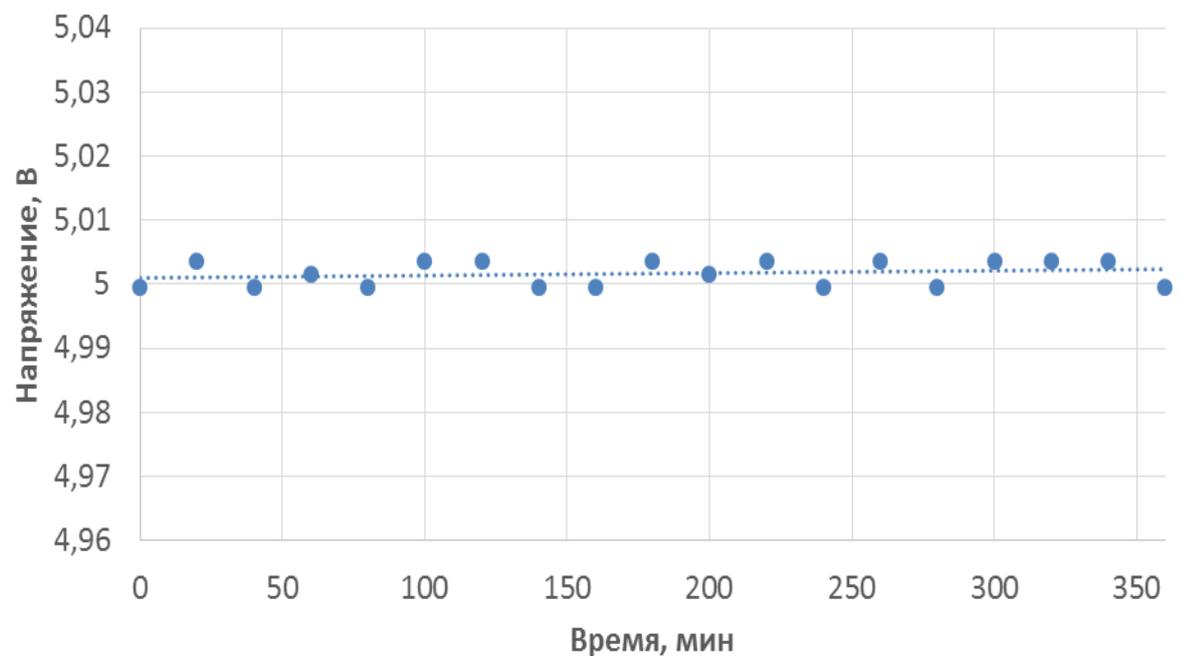


Рисунок 26.График стабильности процесса измерения температуры с помощью диода для 0 °С в течении 6 часов.

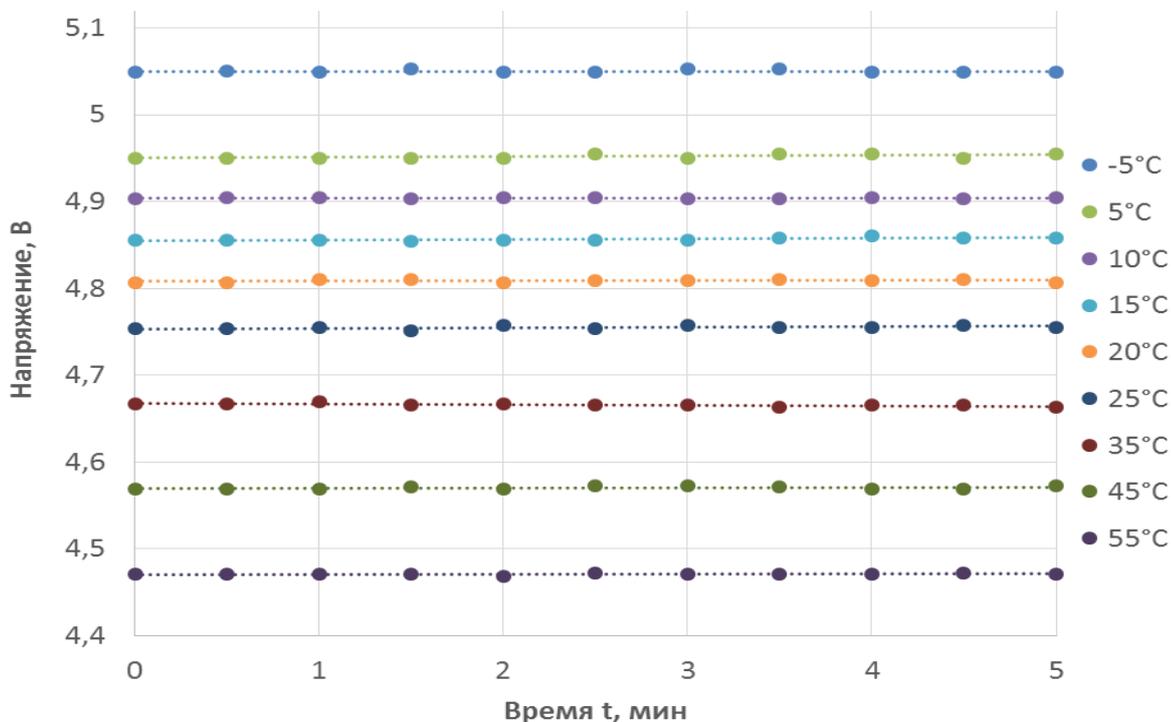


Рисунок 27. График стабильности процесса измерения температуры с помощью диода для диапазона от -5°C до 55°C .

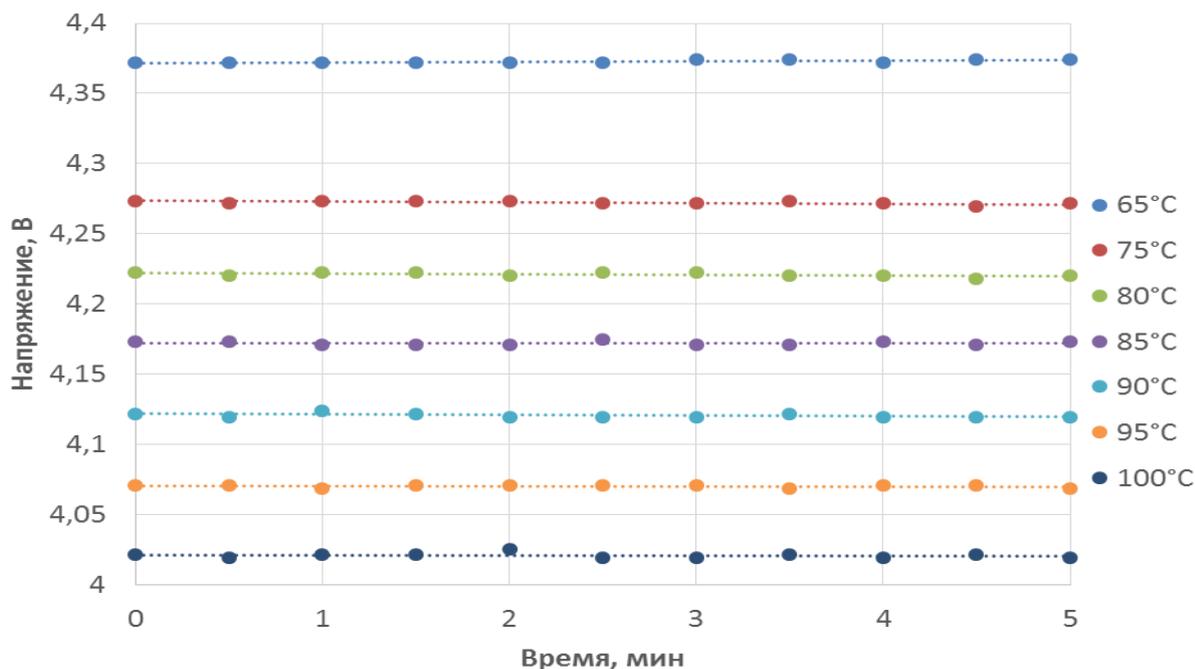


Рисунок 28. График стабильности процесса измерения температуры с помощью диода для диапазона от 65°C до 100°C .

Оценку погрешности измерений проводили следующим образом. Для каждой температуры было снято по 11 значений напряжения, что позволяет провести

расчет статистической погрешности $\Delta U_{\text{изм}}$ по распределению Стьюдента с доверительной вероятностью 0.95.

Помимо статистической, необходимо учесть приборную погрешность выставления температуры термостатом, погрешность квантования по уровню при аналого-цифровом преобразовании, и погрешность, вносимую операционным усилителем при усилении падения напряжения на диоде.

Как указывалось выше, погрешность выставления температуры термостатом согласно паспорту прибора составляет $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Погрешность квантования по уровню при аналого-цифровом преобразовании возникает при округлении измеренного значения напряжения до одного из двух ближайших дискретных уровней напряжения в блоке АЦП. Поэтому указанную погрешность возьмем равной половине кванта преобразования, и рассчитаем по формуле (6):

$$\Delta U_{\text{АЦП}} = (5.1 - 3)/1024 = \pm 1.03 \cdot 10^{-3}\text{В}. \quad (6)$$

Погрешность операционного усилителя определяется множеством факторов: напряжение смещения на выходе, температурный дрейф напряжения, тепловой шум, фликер-шум, и т.д. Согласно технической документации применяемого операционного усилителя TL074 [17], наибольший вклад по абсолютному значению в формирование погрешности сигнала вносит напряжение смещения выхода при нулевой разнице напряжений на входах операционного усилителя (для TL074 при однополярном питании 5 В оно составляет $U_{\text{offset}} = 800$ мкВ). Тепловой дрейф определяется коэффициентом дрейфа $\mu = 2$ мкВ/ $^\circ\text{C}$, а так как при эксплуатации при нормальных условиях температура самого усилителя меняется слабо, вклад этого источника погрешности в дальнейшем будем рассматривать на уровне 10 мкВ, что соответствует изменению температуры усилителя на 5°C . Измерение температуры как медленно меняющегося параметра системы позволяет рассматривать получаемый с диода сигнал как постоянный ток, а на частотах ниже 10 Гц значение напряжения шума на входе у используемого операционного усилителя равно 2 мкВ. С учетом коэффициента усиления, примерно равного 5,

получаем величину напряжения усиленных шумов примерно 10 мкВ. Суммарную погрешность, вносимую усилителем в сигнал, примем равной

$$\Delta U_{0y} = 820 \text{ мкВ.}$$

Учитывая все указанные статистические и приборные погрешности, определим погрешность измерения падения напряжения на диоде по известной формуле (7) расчета косвенной погрешности:

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial U} \Delta U_{\text{АЦП}}\right)^2 + (\Delta T)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial U} \Delta U_{\text{АЦП}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T} \Delta U_{0y}\right)^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \quad (7)$$

Точный вид функции f определить достаточно сложно, поэтому мы будем считать, что все элементы, кроме температуры, вносят равные по весу искажения, т.е. частные производные для первого, третьего и четвертого слагаемых будут равны 1. Коэффициент при температуре определим из эксперимента, определив изменение напряжения при изменении температуры на 1 °С. Для диода он равен $-9.81 \cdot 10^{-3} \text{ В/}^\circ\text{С}$. Рассчитанные величины средних значений падения напряжения, а также погрешностей, представлены в таблице 2. С учетом коэффициента пропорциональности между температурой и падением напряжения на датчике, получаем значения абсолютной погрешности для диода $0.204 \text{ }^\circ\text{С}$.

Таблица 2.

Расчет погрешностей измерения.

| |
|------|
| Диод |
|------|

| $T, ^\circ\text{C}$ | $U, \text{В}$ | $\Delta U_{\text{ст}}, \text{В}$ | $\Delta U, \text{В}$ |
|---------------------|---------------|----------------------------------|----------------------|
| -5 | 5.050 | 0.001 | 0.002 |
| 0 | 5.001 | 0.001 | 0.002 |
| 5 | 4.952 | 0.001 | 0.002 |
| 10 | 4.904 | 0.001 | 0.002 |
| 15 | 4.857 | 0.001 | 0.002 |
| 20 | 4.809 | 0.001 | 0.002 |
| 25 | 4.755 | 0.001 | 0.002 |
| 35 | 4.666 | 0.001 | 0.002 |
| 45 | 4.570 | 0.001 | 0.002 |
| 55 | 4.471 | 0.001 | 0.002 |
| 65 | 4.373 | 0.001 | 0.002 |
| 75 | 4.272 | 0.001 | 0.002 |
| 80 | 4.221 | 0.001 | 0.002 |
| 85 | 4.172 | 0.001 | 0.002 |
| 90 | 4.121 | 0.001 | 0.002 |
| 95 | 4.070 | 0.001 | 0.002 |
| 100 | 4.021 | 0.001 | 0.002 |

По рассчитанным средним значениям падения напряжения от температуры были построен график, изображенный на рисунке 29. Полученные зависимости для диода линейны: величина достоверной аппроксимации линейным трендом близка к 1 и указана на графике. Такой характер зависимости определяет удобство применения диодов в качестве датчиков температуры: интерполяция экспериментальных точек крайне проста.

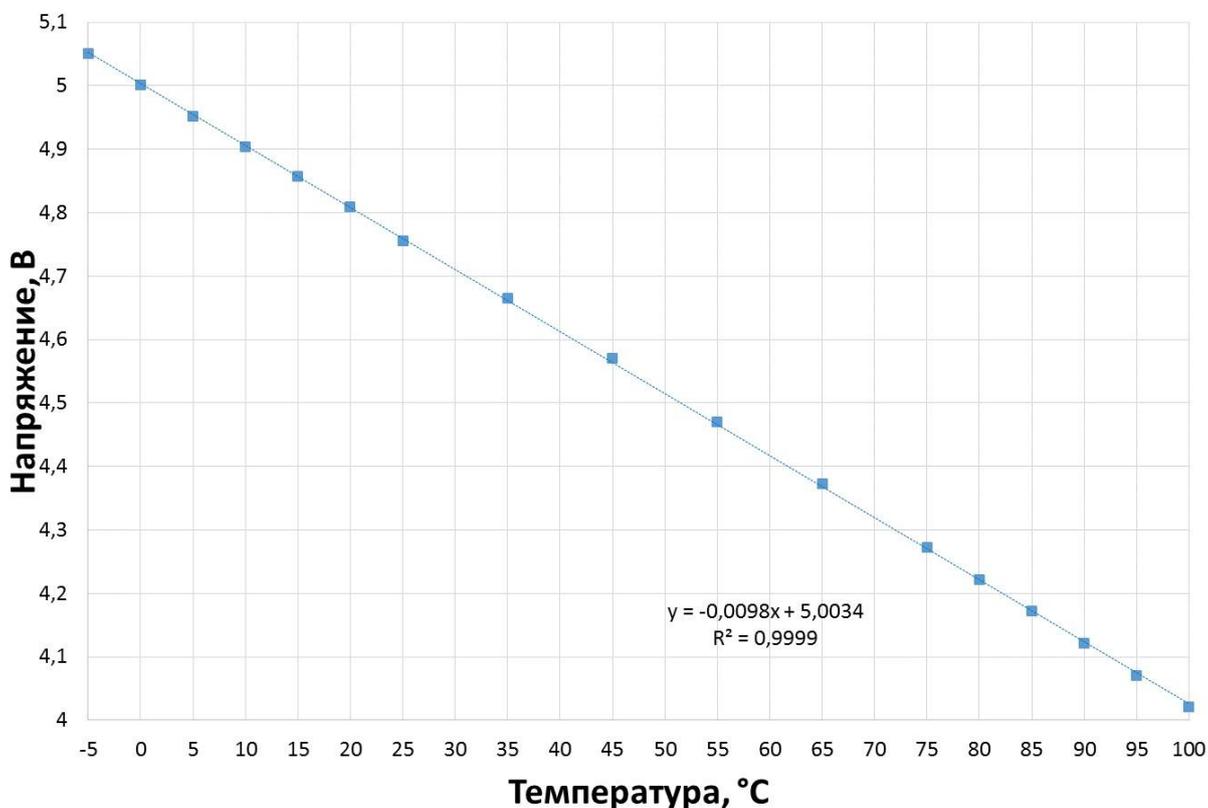


Рисунок 29. График зависимости падения напряжения на диоде от температуры.

3.9. Тестовый эксперимент по измерению давления

Для проведения эксперимента по исследованию роста и диссоциации газогидратов, необходимо постоянно контролировать давление внутри системы. После разработки и создания модуля обработки давления был проведён тестовый эксперимент для определения правильности работы схемы измерителя давления и программы обработки сигналов. Эксперимент проводился следующим образом: датчик давления подключали в закрытую систему и подавали давление в диапазоне от 0.1 до 0.6 МПа с шагом в 0.1 Мпа. Регистрация каждого значения давления происходила в течении одной минуты. После сохранения полученных данных производилось усреднение показаний для каждого значения и были построены графики зависимости показаний с АЦП микроконтроллера, зафиксированных в условных единицах, от давления в системе (рисунок 30). Полученная зависимость линейна: величина достоверной аппроксимации линейным трендом близка к 1 и указана на графике. По полученным уравнениям можно выполнить пересчёт условных единиц в соответствующие значения давления.

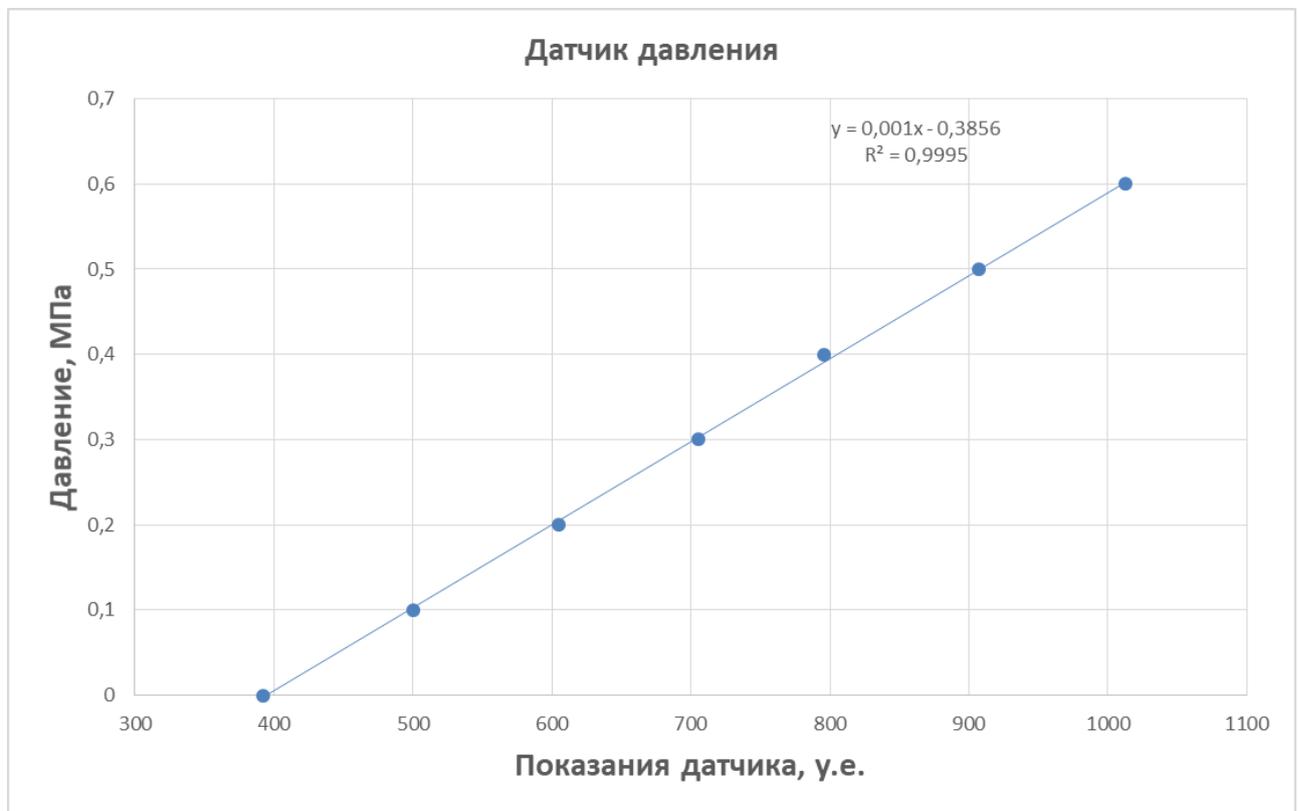


Рисунок 30. График зависимости значений после аналогово-цифрового преобразования от давления.

3.10. Тестовый эксперимент по измерению температуры

После проведения испытаний полупроводниковых диодов в качестве измерителей температуры и определения их пригодности к использованию в лабораторной установке, был проведён тестовый эксперимент на предмет правильности работы схемы измерителя температуры вкупе с программой обработки сигналов. Эксперимент проводился следующим образом: датчики, расположенные внутри капилляров из нержавеющей стали, погружали в тосол так, чтобы капилляры полностью находились в тосоле. Таким образом уменьшалось влияние теплопроводности стали, часть которой находилась при комнатной температуре. После погружения диоды выдерживали в тосоле около минуты для стабилизации температуры, и только после этого начинали регистрировать полученные данные при помощи компьютера. Автоматика термостата поддерживала необходимую температуру в течение всего эксперимента.

При изменении температуры в термостате, происходило падение напряжения на диоде, вследствие чего изменялись значения, полученные в результате аналоговоцифрового преобразования микроконтроллера. Программа обработки

сигналов регистрировала полученные данные и выводила значения на экран раз в секунду. В качестве интервала температуры для измерений был выбран диапазон от -10°C до $+10^{\circ}\text{C}$ с шагом в 1°C . Регистрация каждого значения температуры происходила в течении одной минуты. После сохранения полученных данных производилось усреднение показаний для каждого значения температуры и были построены графики зависимости показаний с АЦП микроконтроллера, зафиксированных в условных единицах, от температуры окружающей среды, изображённые на рисунках 31, 32, 33. Полученные зависимости для диода линейны: величина достоверной аппроксимации линейным трендом близка к 1 и указана на графике. По полученным уравнениям можно выполнить пересчёт условных единиц в соответствующие значения температуры.

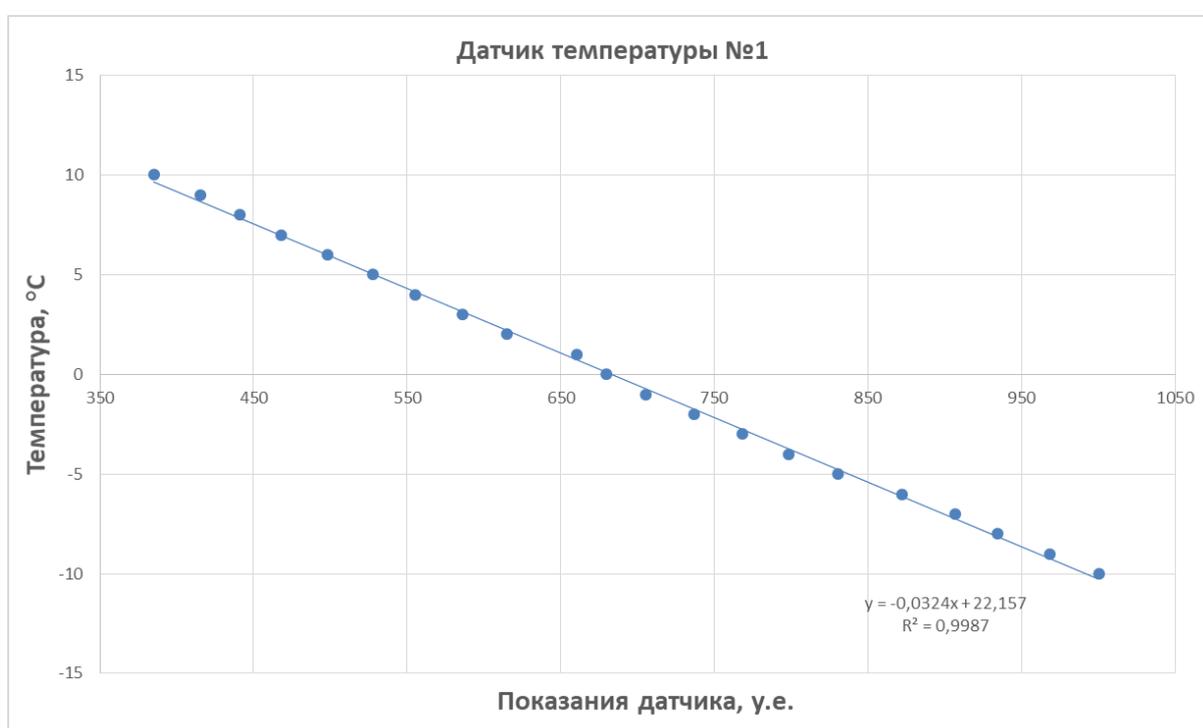


Рисунок 31. График зависимости значений после аналогово-цифрового преобразования от температуры.

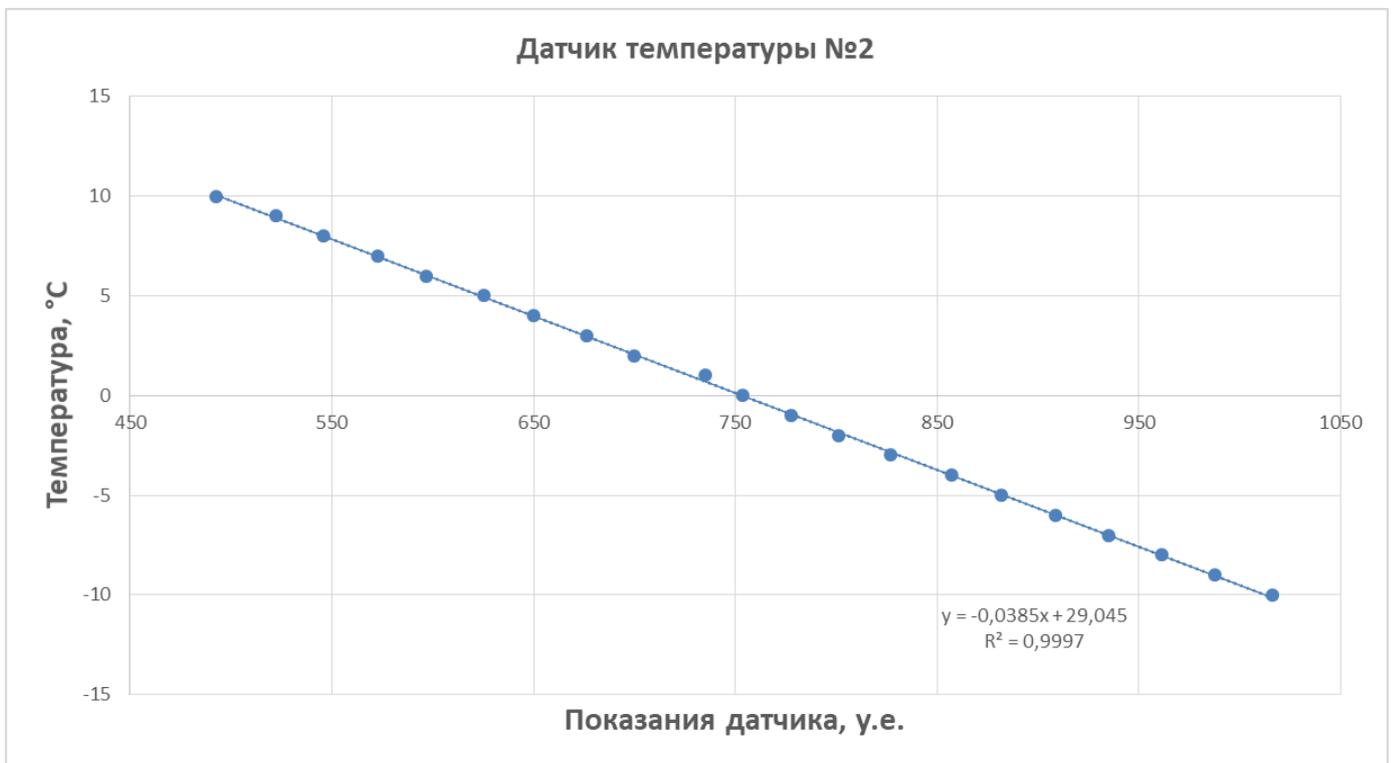


Рисунок 32. График зависимости значений после аналогово-цифрового преобразования от температуры.

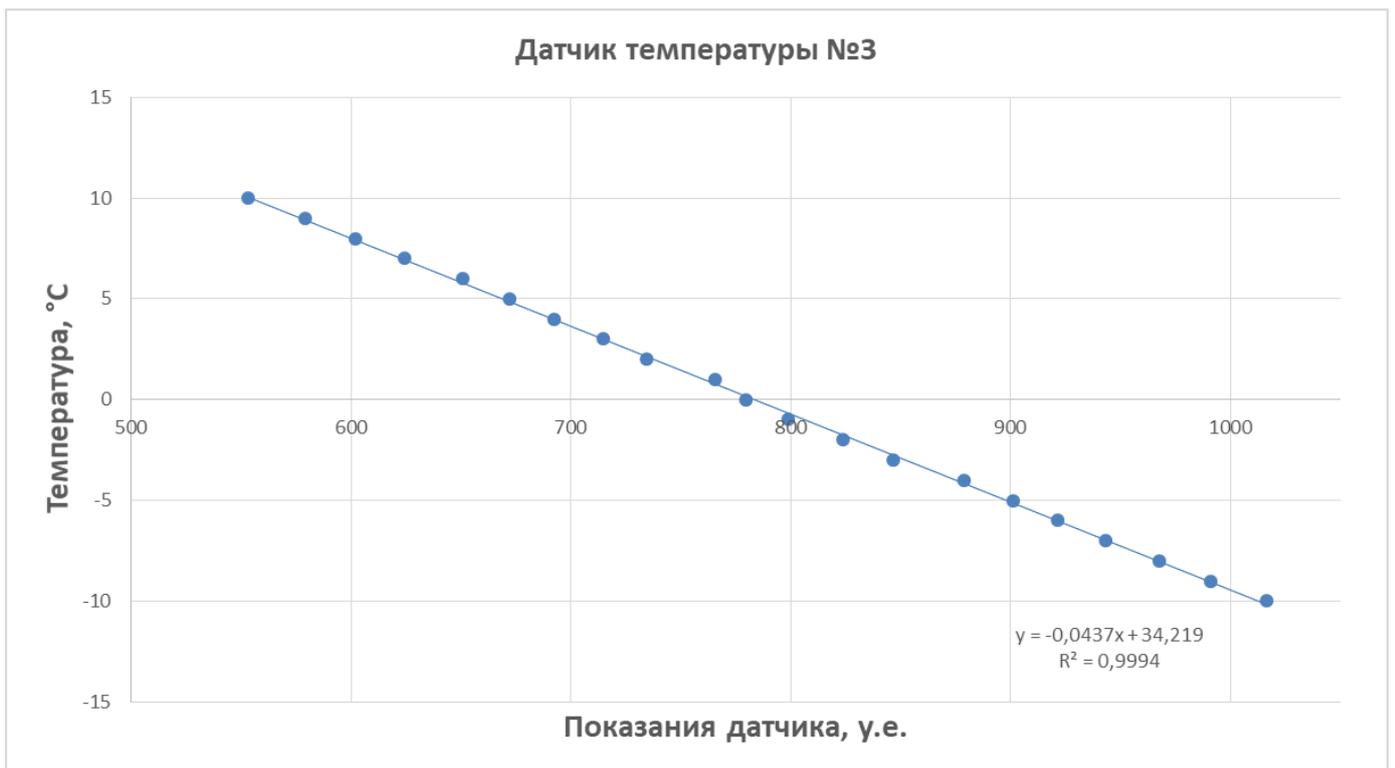


Рисунок 33. График зависимости значений после аналогово-цифрового преобразования от температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведённого анализа наиболее распространённых типов контактных электрических датчиков температуры, было принято решение об использовании измерителя температуры полупроводникового диода в качестве термочувствительного элемента.

Для осуществления экспериментального исследования была разработана и собрана схема измерителя температуры на базе микроконтроллера PIC16F877. Проведён ряд экспериментов по измерению падения напряжения на полупроводниковом диоде КД103Б в зависимости от температуры жидкости в жидкостном термостате. Испытания показали хорошую воспроизводимость результатов и стабильность работы измерителя.

Был разработан и собран новый реактор высокого давления для лабораторной установки регистрации физических параметров процесса формирования газогидратов.

По сравнению с предыдущей версией реактора, новый обладает следующими преимуществами:

- высокая коррозионная стойкость;
- герметичность;
- возможность размещения датчиков температуры; □ простота в эксплуатации и обслуживании.

После проведения тестовых экспериментов было выявлено, что программа обработки сигналов работает корректно и стабильно. По полученным данным аналогово-цифрового преобразования были построены калибровочные графики для каждого датчика, показывающие зависимость показаний с датчиков от температуры. По графикам видно, что зависимости линейны: величина достоверной аппроксимации линейным трендом близка к 1 и указана на графике. По полученным уравнениям можно выполнить пересчёт условных единиц в соответствующие значения температуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нифантов А.В. Создание методики математического моделирования разработки газогидратных месторождений термическими методами: дисс. ... канд. тех. наук: 25.00.17 / Нифантов Александр Викторович. - Москва, 2016. – 141 с.
2. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана № 2. – Техасский университет, США, 2010. – 21 с.
3. Ширшова А.В. Физика деформированного твердого тела. Исследование газогидратов: учебно-методическое пособие для студентов направления 16.03.01 "Техническая физика" очной формы обучения. – Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2016. – 5–15 с.
4. Гидраты природных газов. [Электронный ресурс]: URL: <https://poznayka.org/s30101t1.html>
5. Конев В.В., Созонов С.В., Бородин Д.М., Половников Е.В. Датчики для исследования теплового состояния машин, эксплуатируемых в условиях крайнего севера и арктики // Инженерный вестник Дона. – Ростов-на-Дону, 2015. – 48 с.
6. Способы измерения температуры с помощью термопар. [Электронный ресурс]: URL: <http://radiohobby.org/modules/news/article.php?storyid=1170>
7. Подключение термопары к микроконтроллеру. [Электронный ресурс]: URL: http://avrproject.ru/publ/kak_podkljuchit/podkljuchaem_termoparu_k_mikrokontrolleru/2http://avrproject.ru/publ/kak_podkljuchit/podkljuchaem_termoparu_k_mikrokontrolleru/2-1-0-701-0-70
8. Краснопевцев А.В., Соколов Е.А., Бридский А.В. Тепловые датчики в пожарных системах безопасности // Сборник трудов конференции «Прогрессивные технологии и процессы». – Курск. 2015. – 100-105с.
9. Полупроводниковые датчики температуры [Электронный ресурс]: URL:<http://mcucpu.ru/index.php/pdevices/datchiki/108poluprovodnikovye..>

10. Термодатчики на диодах в схемах на микроконтроллере. [Электронный ресурс]: URL: <http://nauchebe.net/2011/02/termodatchiki-na-diodax%C2%A0-v-sxemaxhttp://nauchebe.net/2011/02/termodatchiki-na-diodax%C2%A0-v-sxemax-na-mk/na-mk/>
11. Датчики температуры. [Электронный ресурс]: URL: http://elektromehanika.org/publ/stati_po_ehlektronike/datchiki_temperatury_4_chasti/4-1-0-1270-127
12. Реализации функции термодатчика во встраиваемой системе. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2193/doc/48426/>
13. Температурные датчики. Терморезисторы в схемах на микроконтроллере. [Электронный ресурс]: URL: <http://nauchebe.net/2011/04/temperaturnye-datchikihttp://nauchebe.net/2011/04/temperaturnye-datchiki-termorezistory-v-sxemax-na-mk/termorezistory-v-sxemax-na-mk/>
14. Документация на полупроводниковый диод КД103Б. [Электронный ресурс]: URL: <http://rudatasheet.ru/diodes/kd103/>
15. Документация микроконтроллеров семейства Pic16F87х. [Электронный ресурс]: URL: www.microchip.ru/files/d-sheets-rus/pic16f87x.pdf
16. Документация интегрального линейного стабилизатора напряжения 7805. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7810.pdf>
17. Документация на операционный усилитель TL074. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl074.pdf>
18. Документация на полевой транзистор BSS84P. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.infineon.com/dgdl?fileId=db3a304330f68606013118ac7a9b4549>
19. Хоровиц П., Хилл У. / Искусство схемотехники. // М: Мир, 2009. – 704 с.
20. Хелибайк Ч. / Программирование PIC-микроконтроллеров на PicBasic. // М: Додэка XXI. – 2007. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходный код программы микроконтроллера на языке Proton PicBasic.

```
Device 16F877
Xtal 20
Declare Adin_Res = 10 ' 10-bit result required
Declare Adin_Tad = FRC ' RC oscillator chosen
Declare Adin_Stime = 50 ' Allow 50us sample time

Declare Hserial_Baud = 9600
Declare Hserial_RCSTA = %10010000
Declare Hserial_TXSTA = %00100000
Declare Hserial_Clear = On

Dim send As Bit
Dim rcv As Byte
Dim A1 As Word
Dim A2 As Word
Dim A3 As Word
Dim A4 As Word
Dim A5 As Word
Dim A6 As Word
Dim A7 As Word
Dim B1 As Byte
Dim B2 As Byte
Dim B3 As Byte
Dim B4 As Byte
Dim B5 As Byte
Dim B6 As Byte
Dim B7 As Byte
init:
    TRISB = %00000000
    TRISC = %10000000
ADCON1 = %10000001
    rcv = 0
send = 0 Main:
    PORTB.7 = ~ PORTB.7
```

```

    HSerIn 250, Main, [rcv]
If rcv = %01010101 Then
send = 1
    GoTo Work
EndIf
GoTo Main Work:
PORTB.7 = ~ PORTB.7
    HSerIn 982, Ladin, [rcv]
If rcv = %01010100 Then
send = 0
    GoTo Main
EndIf  Ladin:
A1 = ADIn 0
A2 = ADIn 1
A3 = ADIn 2
A4 = ADIn 4
A5 = ADIn 5
A6 = ADIn 6
A7 = ADIn 7
A1 = A1 << 1
A2 = A2 << 1
A3 = A3 << 1
A4 = A4 << 1
A5 = A5 << 1
A6 = A6 << 1
A7 = A7 << 1
B1 = A1.LowByte
B1 = B1 >> 1
B2 = A2.LowByte
B2 = B2 >> 1
B3 = A3.LowByte
B3 = B3 >> 1
B4 = A4.LowByte
B4 = B4 >> 1
B5 = A5.LowByte
B5 = B5 >> 1
B6 = A6.LowByte
B6 = B6 >> 1
B7 = A7.LowByte
B7 = B7 >> 1

    HSerOut
[%10101000,A1.HighByte,B1,A2.HighByte,B2,A3.HighByte,B3,A4.HighByte,B4,A5.Hi
ghB yte,B5,A6.HighByte,B6,A7.HighByte,B7]

```

Исходный код программы обработки сигнала, написанной в открытой среде разработки программного обеспечения Lazarus на языке Object Pascal.

```

unit Unit1;
interface uses
    Classes, SysUtils, FileUtil, LazSerial, Forms, Controls, Graphics, Dialogs,
    StdCtrls; type
    TForm1 = class(TForm)
btStart: TButton;   btConnect:
TButton;   Button1: TButton;
    LazSerial1: TLazSerial;
    Memo1: TMemo;
    SaveDialog1: TSaveDialog;   procedure
btSetupClick(Sender: TObject);   procedure
btStartClick(Sender: TObject);   procedure
btConnectClick(Sender: TObject);   procedure
Button1Click(Sender: TObject);   procedure
LazSerial1RxData(Sender: TObject); private
    { private declarations }   public
    { public declarations }
end; var
    Form1: TForm1; implementation
var
    CurPos, Counter: integer;
    FTempStr: String;
    StartByte: Byte;
    AData: Array [1..14] of byte;
    procedure TForm1.btStartClick(Sender: TObject); begin
        if btStart.Caption = 'Start' then
            begin
                btStart.Caption:=                               'Stop';
LazSerial1.WriteData(Char(85));
            end else   begin
                btStart.Caption:= 'Start';
LazSerial1.WriteData(Char(84));   end;
end;
    procedure TForm1.btSetupClick(Sender: TObject); begin
        LazSerial1.ShowSetupDialog;
end;

```

```

procedure TForm1.btConnectClick(Sender: TObject); begin
  if btConnect.Caption = 'Connect' then

    begin
      LazSerial1.ShowSetupDialog;
LazSerial1.Open;
      btConnect.Caption:= 'Connected';
      Counter:= 0;
end; end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject); begin
  with SaveDialog1 do if Execute then Memo1.Lines.SaveToFile(FileName); end;
procedure TForm1.LazSerial1RxData(Sender: TObject); var
  Str, DataStr: string;
  i: integer; begin
  Str:= LazSerial1.ReadData;
  FTempStr:= FTempStr + Str;  CurPos:=
Pos( Char(168) ,Str);
  if (CurPos <> 0) and (Length(FTempStr) > (14 + CurPos)) then  begin
    DataStr:= Copy(FTempStr, CurPos, 15);
    Delete(FTempStr,      CurPos,      15);
StartByte:= Ord(DataStr[1]);
    for i:=1 to 14 do
      begin
        AData[i]:=      Ord(DataStr[i+1]);
end;
    if StartByte = 168 then
      begin
        Str:="";  for i:=
1 to 7 do
          begin
            Str:= Str + IntToStr(ADate[2*i-1]*128 + AData[2*i]) + ' ';
end;
            Counter:= Counter + 1;
            DataStr:= IntToStr(Counter) + ' ' + TimeToStr(SysUtils.Time) + ' ' + Str;
            Memo1.Lines.Add(DataStr);
end; end end; end.

```

